

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Ovlivnění tuhnutí a krystalizace hořčíkových slitin
Solidification and Crystalization of the Magnesium Alloys

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra slévarensství

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Marie Crkoňová**
Studijní program: N2109 Metalurgické inženýrství
Studijní obor: 2109T033 Slévárenské technologie
Téma: **Ovlivnění tuhnutí a krystalizace hořčíkových slitin**
Solidification and Crystalization of the Magnesium Alloys

Zásady pro vypracování:

1. Úvod.
2. Cíl práce.
3. Vlastnosti slévárenských slitin hořčíku.
4. Experimentální část.
5. Zhodnocení naměřených výsledků.
6. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] MORDIKE, B. L.; EBERT, T.: Magnesium, properties – application – potential. *Materials Science A* 302. 2001, s.37-45.
- [2] Properties of Cast Magnesium Alloys. Dostupné na World Wide Web:
<http://mg.tripod.com/asm_prop.htm>
- [3] DRÁPALA, J.; KUCHAR, L.; TOMÁŠEK, K.; TROJANOVÁ, Z.: *Magnesium, its alloys and Mg – admixture binary system*. VŠB – TU Ostrava, s 172, 2004, ISBN 80-248-0579-0.
- [4] ROUČKA, J.: *Metalurgie neželezných slitin*. VUT Brno, 2004.
- [5] PTÁČEK, L.: Slévárenské slitiny hořčíku. *Slévarensství LII*, č. 2-3, s.61-66.


Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Aleš Hanus**

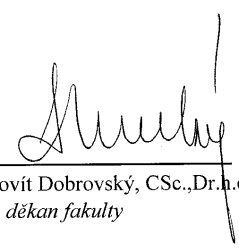
Konzultant diplomové práce: Ing. Petr Lichý, Ph.D.

Datum zadání: 15.07.2010

Datum odevzdání: 20.04.2011



prof. Ing. Tomáš Elbel, CSc.
vedoucí katedry



prof. Ing. Eudovít Dobrovský, CSc., Dr.h.c.
děkan fakulty

Zásady pro vypracování diplomové práce

I.

Diplomovou prací (dále jen DP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

II.

Uspořádání diplomové práce:

- | | |
|--|------------------------------|
| 1. Titulní list | 5. Obsah DP |
| 2. Zásady pro vypracování DP | 6. Textová část DP |
| 3. Prohlášení + místopřísežné prohlášení | 7. Seznam použité literatury |
| 4. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky | 8. Přílohy |

ad 1) Titulním listem je originál zadání DP, který student obdrží na své oborové katedře.

ad 2) Tyto „Zásady pro vypracování diplomové práce“ následují za titulním listem.

ad 3) Prohlášení + místopřísežné prohlášení napsané na zvláštním listě (student jej obdrží na své oborové katedře) a vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání DP. *V případě, že DP vychází ze spolupráce s jinými právníckými a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracující právnícké nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním DP.*

ad 4) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listě česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.

ad 5) Obsah DP se uvádí na zvláštním listě. Zahrnuje názvy všech očíslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části DP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury, s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.

ad 6) Textová část DP obvykle zahrnuje:

- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním DP;
- Vlastní rozpracování DP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry, vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
- Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků DP z hlediska stanoveného zadání.

DP bude zpracována v rozsahu min. 45 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury). Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující doporučené úpravy - písmo Times New Roman (nebo podobné) 12b; řádkování 1,5; okraje – horní, dolní – 2,5 cm, levý – 3 cm, pravý 2 cm. Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na ně být v textu poukázáno. Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné, jako přílohy (viz ad 8).

Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost. U vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury.

Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

- ad 7) DP bude obsahovat alespoň 15 literárních odkazů, z toho nejméně 5 v některém ze světových jazyků.

Seznam použité literatury se píše na zvláštním listě. **Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690.** Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu DP.

- ad 8) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části např. z důvodu ztráty srozumitelnosti.

III.

Diplomovou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto:

nahoře: *Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava*
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra

uprostřed: *DIPLOMOVÁ PRÁCE*

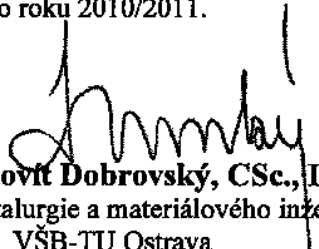
dole: *Rok* *Jméno a příjmení*

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní práci také v elektronické formě do IS EDISON včetně abstraktu a klíčových slov v češtině a angličtině.

IV.

Diplomová práce, která neodpovídá těmto zásadám, nemůže být přijata k obhajobě. Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem magisterského, resp. navazujícího magisterského studia fakulty metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2010/2011.

Ostrava 30. 11. 2010


Prof. Ing. Ludovít Dobrovský, CSc., Dr.h.c.
děkan fakulty metalurgie a materiálového inženýrství
VŠB-TU Ostrava

PROHLÁŠENÍ STUDENTA

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě, 29. 4. 2011

.....
podpis studenta

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že n moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména §35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a §60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB – TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB – TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB – TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB – TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB – TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své diplomové práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.
- Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci vypracovala samostatně.

V Ostravě.....

.....
jméno a příjmení studenta

.....
adresa trvalého pobytu studenta

PODĚKOVÁNÍ

Tato diplomová práce vznikla za podpory projektu MSM 6198910013 „Procesy přípravy a vlastnosti vysoce čistých a strukturně definovaných speciálních materiálů“.

Tímto děkuji svému vedoucímu Ing. Aleši Hanusovi Ph.D, Ing. Petru Lichému Ph.D a Ing. Michalovi Cagalovi za cenné rady a ochotnou pomoc při zpracování mé diplomové práce. Dále bych chtěla poděkovat paní Miroslavě Subíkové z katedry materiálového inženýrství.

ABSTRAKT

Tato práce se zaměřuje na ovlivnění tuhnutí a krystalizace hořčíkových slitin. Námi vybrané komerční slitiny podrobujeme termické analýze, její derivaci a metalografii. Teoretická část se zabývá hořčíkem a jeho slitinami, od historie přes charakteristiku, vlastnosti, výrobu až po zpracování odléváním, tvářením a použití slitin v běžné praxi. V experimentální části jsou popsány použité postupy a následné zhodnocení jak termické analýze, tak metalografických výbrusů.

V závěru práce jsou shrnuty dosažené výsledky. Byly prokázány teoretické předpoklady ovlivnění struktury očkovaním a vliv byl ukázán i na křivkách ochlazování. Z těchto závěrů plyne doporučení pro další zkoumání.

CRKOŇOVÁ, M. Ovlivnění tuhnutí a krystalizace hořčíkových slitin. Ostrava:
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství VŠB -Technická univerzita Ostrava,
2011, 64s. Diplomová práce, vedoucí: Ing. Aleš Hanus, Ph.D.

Klíčová slova: Hořčík, hořčíkové slitiny, vlastnosti Mg slitin, termická analýza, metalografie

ABSTRACT

This work focuses on the influence of solidification and crystallization of the magnesium alloys. Selected commercial alloys are subjected to thermal analysis, its derivativiton and to metallography. The theoretical part deals with magnesium and its alloys, from history through the characteristics, properties, production till its processing by the casting, forming and using of the alloys in common use. The experimental section describes used procedures and the subsequent evaluation of both thermal analysis and metallographic sections.

The conclusion summarizes reached results. Theoretical assumptions have been shown in affeccion of the structure and vaccination, which was also shown on the curves of cooling. These findings follows the recommendations for further investigation.

CRKONŮVÁ, M. Solidification and Crystalization of the Magnesium Alloys. Faculty of Metalurgy and Material Engineering VŠB-Technical University of Ostrava, 2011, 64p. Thesis, head: Ing. Aleš Hanus, Ph.D.

Key words: Magnesium, magnesium alloys, properties of magnesium alloys, thermal analysis, metallography

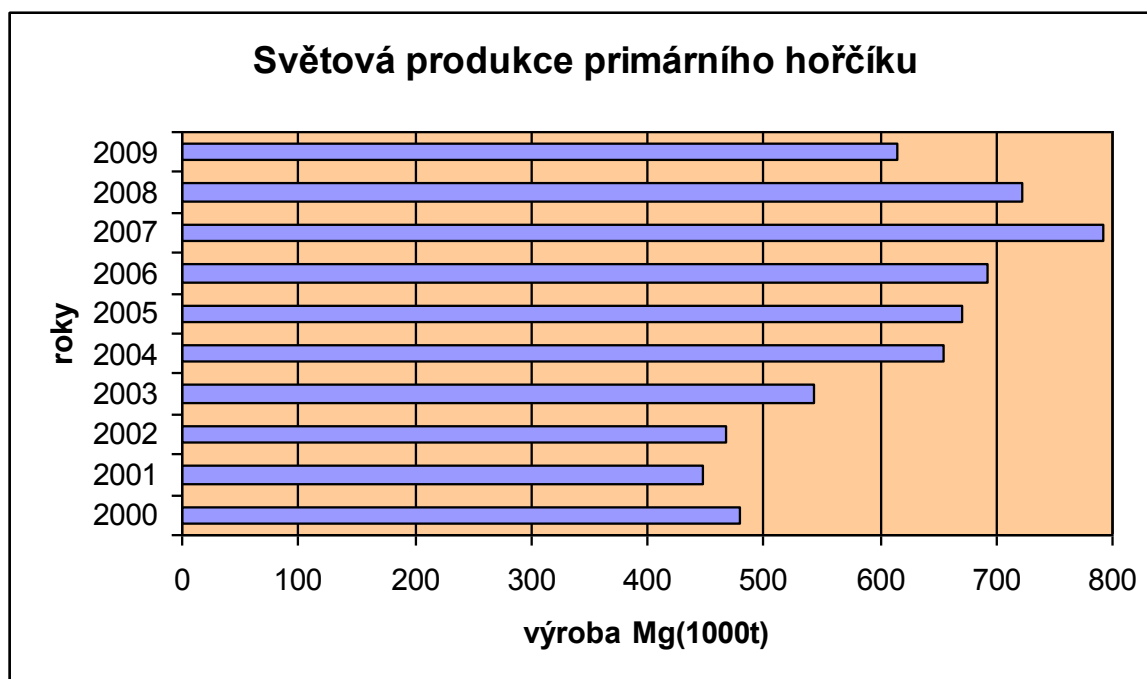
OBSAH

1. ÚVOD	3
2. CÍL PRÁCE	4
3. ČÁST TEORETICKÁ	5
3.1 HOŘČÍK A JEHO SLITINY	5
3.1.1 Historický vývoj.....	5
3.1.2 Charakteristika.....	6
3.1.3 Fyzikálně chemické vlastnosti čistého hořčíku	6
3.1.4 Výroba	7
3.2 SLITINY HOŘČÍKU	8
3.2.1 Slévárenské slitiny.....	11
3.2.1.1 Slitina Mg-Al	12
3.2.1.2 Slitina Mg-Mn.....	13
3.2.1.3 Slitina Mg-Zn	14
3.2.1.4 Slitina Mg-Li.....	16
3.2.2 Slitiny pro tváření.....	17
3.3 TAVENÍ SLITIN HOŘČÍKU	19
3.3.1 Technologie výroby odlitků.....	19
3.3.1.1. Tlakové lití	19
3.3.1.2. Gravitační lití do pískových forem	22
3.3.1.3. Speciální technologie odlévání	22
3.3.2 Praktické zásady	24
3.3.3 Tavení.....	26
3.4 POUŽITÍ HOŘČÍKOVÝCH SLITIN	27
4. ČÁST EXPERIMENTÁLNÍ	29
4.1 PŘÍPRAVA MATERIÁLU	29
4.2 TERMICKÁ ANALÝZA A JEJÍ DERIVACE.....	29
4.2.1 Příprava zařízení.....	30
4.2.2 Tavba.....	31
4.2.3 Grafické znázornění křivek ochlazování a jejich derivace	32
4.2.4 Vyhodnocení výsledků termické analýzy.....	40
4.3 METALOGRAFIE	43

4.3.1	<i>Příprava vzorků</i>	43
4.3.2	<i>Získané metalografické struktury</i>	44
4.3.3	<i>Zhodnocení struktur</i>	54
5.	ZÁVĚR	55
6.	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	56
	PŘÍLOHY	59

1. ÚVOD

Největším zdrojem hořčíku jsou oceány, přírodní jezera, průmyslové solanky, jako např. Mrtvé moře, Solné jezero v Utahu a je hojně obsažen i v zemské kůře. Jeho zásoby jsou považovány za nevyčerpatelné. Zemí, ve kterých se hořčík vyrábí, je oproti jiným neželezným kovům málo, svědčí to i o jakési technické a ekologické vyspělosti státu. V roce 1996 měly USA dominantní postavení v produkci hořčíku, ale během následujících šesti let byly předstihnuty Kanadou. Z prognóz a statistik firmy Norsk Hydro Magnesium vzrostla spotřeba hořčíkových slitin v letech 1991-2001 asi desetkrát, jelikož silný nárůst produkce hořčíku v roce 2001 v Číně dramaticky snížil ceny. Na mezinárodním trhu se předpokládalo, že tato spotřeba bude i nadále stoupat. Čína je od roku 2000 největším producentem surového hořčíku, další jsou v žebříku USA, Rusko a Kanada, jak bylo předpovězeno, spotřeba hořčíku se zvedala. Čínská produkce hořčíku v roce 2000 byla odhadovaná na 160 000 t. Do dalších pěti let se čínská výroba zdvojnásobila, podle IMA (International Magnesium Assotiation) byla výroba primárního hořčíku v roce 2007 největší - až 627 000 t. Nicméně v roce 2008 v důsledku celosvětové krize se spotřeba zastavila, nebo začala klesat (obr. 1). [1, 2]



Obr. 1 Světová produkce primárního hořčíku [2]

2. CÍL PRÁCE

Cílem této práce je zjistit vliv očkovačla Mikrosal Mg T 200 na výslednou strukturu u čistého Mg (99,95 %) a vybraných slitin:

- AZ91 - slitina hořčíku, hliníku (9 %), zinku (1 %) a vedlejší přísadové prvky
- AM60 - slitina hořčíku, hliníku (6 %), manganu (do 0,1 %) a vedlejší přísadové prvky
- AMZ40 - slitina hořčíku, hliníku (4 %), manganu do 1 %, zinku do 1 % a vedlejší přísadové prvky
- AJ62 - slitina hořčíku, hliníku (6 %), stroncium (2 %) a vedlejší přísadové prvky.

Dále je důležité naměřit vliv očkování na křivkách ochlazování s použitím derivace těchto křivek. Pro dosažení cíle bylo nutné nejdříve provést teoretický rozbor literatury, realizovat postup tavení na katedře slévárenství VŠB-TU Ostrava, podrobit vzorky metalografií a následně zhodnotit dosažené výsledky.

3. ČÁST TEORETICKÁ

3.1 Hořčík a jeho slitiny

3.1.1 Historický vývoj

Latinský název magnesium je odvozen od řecké oblasti Magnesia v Thesally, kde se hořčík využíval k léčbě již v době rozkvětu řecké kultury v podobě „magnesia alba“, což je sůl hořčíku. Na konci 17. století se v Epsonu v Anglii používalo síranu hořečnatého (tzv. hořké soli neboli Epson salt) v lékařství. Oxid hořečnatý byl na počátku 18. století nazýván hořká zemina. První, kdo začal rozeznávat hořkou a vápennou zeminu, byl skotský chemik Joseph Black roku 1755. Poprvé byl hořčík v elementární formě vyroben elektrolýzou taveniny chloridu hořečnatého $MgCl_2$ a připravil ho britský chemik a vědec sir Humphry Davy roku 1808. V témže roce objevil vedle hořčíku také sodík, vápník a draslík. Chemickou cestou byl poprvé připraven působením par kovového draslíku na bezvodý chlorid hořečnatý. Tuto přípravu hořčíku provedl Antoine Alexandre Brutun Bussy v roce 1830. Další, kdo připravil Mg elektrolýzou roztoku chloridu hořečnatého, byl v roce 1833 proslulý vědec a bývalý asistent sira Davyho Michael Faraday. Tento experiment ověřil němec Robert-Wilhelm Bunsen v Heidelbergu v roce 1852 a sestrojil aparaturu pro elektrolytickou výrobu hořčíku. [3, 4]

Historie používání hořčíkových slitin je poměrně krátká a je spojena hlavně s rozvojem automobilového průmyslu a letectví. Velký rozvoj výroby byl zaznamenán zejména po začátku 2. světové války v roce 1939. I když se hořčíkový průmysl snažil po válce rozvíjet v řadě aplikací, ve většině selhal a produkce hořčíku tak drasticky klesla. Nejvíce úspěšnou aplikací je velice známý příklad sériového nasazení hořčíkových odlitků (kliková skříň a skříň převodovky) při výrobě auta VW-brouk u firmy Volkswagen a to díky Prof. Ferdinandu Porschemu, který měl pro tuto firmu navrhnout „lidové vozidlo“. Asi až od 80. let 20. století byl zaznamenán prudký nárůst produkce hořčíku, kdy se vedle automobilového průmyslu používal hořčík i v oblasti legování hliníkových slitin a také při odsíření surového železa. [5]

3.1.2 Charakteristika

Hořčík je šestým nejrozšířenějším prvkem na Zemi, tvoří 2 % hmoty zemské kůry a 0,1 % hmotnosti oceánů. Patří mezi alkalické kovy druhé skupiny chemických prvků. Česky se hořčík nazývá podle hořké soli, jeho chemická značka je Mg a latinsky je Magnesium. Je velmi lehký (2/3 měrné hmotnosti hliníku), středně tvrdý, stříbrolesklý kov. Reaguje za normální teploty pomalu s kyslíkem a s vodou. Na suchém vzduchu se postupně pokryje vrstvou oxidu, která jej chrání před další oxidací. Při hoření hořčíku na vzduchu vzniká velmi intenzivní bílé světlo. Je velmi reaktivní, proto se v přírodě vyskytuje pouze ve sloučeninách. Ačkoli se hořčík nachází ve více než 60 minerálech, jen málo z nich má komerční význam, některé jsou uvedeny v tab. 1. Sloučeniny hořčíku [6], především oxid hořečnatý, se používá hlavně jako žáruvzdorný materiál vyzdívek pecí pro výrobu železa, oceli, neželezných kovů, skla a cementu, má vysoký bod tání, a proto je vhodný i jako ostřívo pro formovací směsi. Chlorid hořečnatý je obsažen v mořské vodě.

Tab. 1 Hlavní zdroje hořčíku [7]

Minerál, sloučenina	chemická značka
Dolomit	$\text{MgCO}_3 \cdot \text{CaCO}_3$
Magnezit	MgCO_3
Bishofit	$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Oxid hořečnatý (Periklas)	MgO
Chlorid hořečnatý	MgCl_2

Hořčík je také velmi významným biogenním prvkem. Vyskytuje se ve všech zelených rostlinách, kde je součástí chlorofylu. Rostliny se tak stávají součástí nejenom potravinového řetězce pro vyšší živočichy, ale současně i zdrojem hořčíku.

3.1.3 Fyzikálně chemické vlastnosti čistého hořčíku

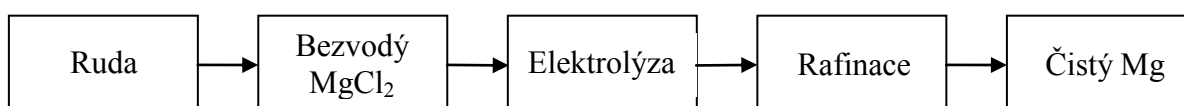
Hořčík krystalizuje v hexagonální krystalografické mřížce s nejtěsnějším uspořádáním, proto jej nelze za pokojové teploty tvářet. Jakmile se ale teplota zvýší (nad 225 °C), vznikají nové bazální roviny a tím se stává dobře tvárným materiálem. V následující tab. 2 jsou zobrazeny alespoň některé důležité vlastnosti čistého hořčíku.

Tab. 2 Důležité vlastnosti čistého hořčíku [8, 9]

bod varu při atmosférickém tlaku	1090 °C
bod tání při atmosférickém tlaku	650 °C
měrná tepelná kapacita (při 20 °C)	1,03 kJ/kg.K
skupenské teplo tání	372 kJ/kg
tepelná vodivost (při 20 °C)	155W/m.K
lineární tepelná roztažnost (20-100 °C)	$26,1 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$
s rostoucí teplotou vzrůstá (nad 400 °C)	$30,7 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$
součinitel stahování při tuhnutí	4,2 %
atomová hmotnost	24,305
atomové číslo	12
hustota při 20 °C	$1,738 \text{ g/cm}^3$
hustota pevného při teplotě tání	$1,65 \text{ g/cm}^3$
hustota roztaveného při 680 °C	$1,55 \text{ g/cm}^3$

3.1.4 Výroba

Asi ze 75 % se kovový hořčík vyrábí obvykle elektrolyticky. Výroba spočívá v převedení oxidických hořčíkových rud na chlorid hořečnatý. Následně se elektrolýzou taveniny MgCl_2 vyrobí čistý Mg (obr. 2). Touto metodou lze vyrobit hořčík o čistotě 99,98 %.



Obr. 2 Schéma výroby Mg

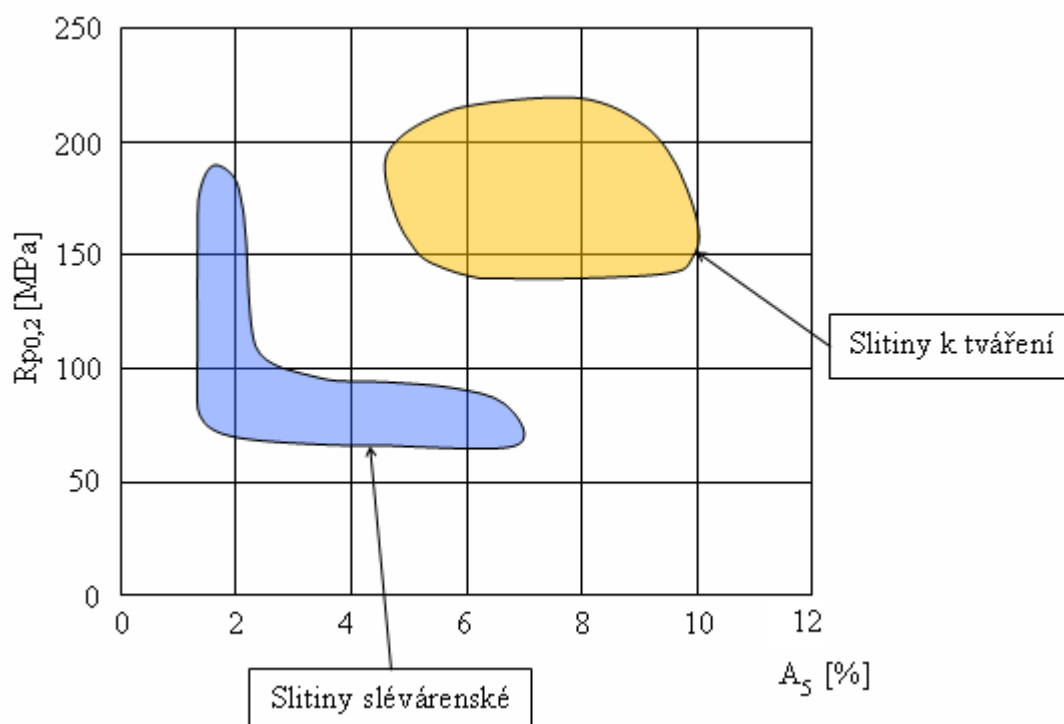
Zbýlých 25 % se provádí tepelnou redukcí. A to buď karbotermickým způsobem nebo silikotermickým. Tímto způsobem se dá vyrobit hořčík o čistotě 99,95 %.

Oba způsoby výroby hořčíku vyžadují velký energetický vklad, propracovanou technologii a při výrobě je nutno čelit problémům souvisejícím s životním prostředím a bezpečnostním rizikům. [10]

3.2 Slitiny hořčíku

V technické praxi se hořčík používá výhradně jako slitiny, jelikož čistý se přes svoji nízkou hustotu ke konstrukčním účelům téměř nepoužívá, má malou pevnost, špatnou tvárnost za studena a anizotropní vlastnosti. Slitiny hořčíku mají příznivý poměr mezi pevností a hustotou, dobré slévárenské vlastnosti, výbornou obrobiteľnost, relativně nízkou cenu, dobrou dostupnost, schopnost zlepšit kvalitu povrchu dalším zpracováním, vysokou tuhost a zároveň dobrou schopnost útlumu vibrací atd. Nevýhodou slitin hořčíku je prudký pokles pevnosti za zvýšených teplot. Toto chování omezuje jejich použití na max. 120 °C. Další nevýhodou je jejich odolnost proti creepu. Velké zlepšení pevnosti za vyšších teplot (až do 450 °C) se dosahuje legováním s kovy vzácných zemin (Pr, Nd, Th). Další nevýhody jsou špatná korozní odolnost, zhoršená svařitelnost a vysoká reaktivita. Hořčíkové slitiny je možné spojovat všemi obvyklými metodami např. svařováním, pájením, lepením, nýtováním a sešroubováním. [11, 12]

Oblasti použití pro slévárenství a tváření jsou ukázány dle mechanických hodnot na obr. 2. Slitiny hořčíku tedy obecně rozdělujeme na slitiny vhodné pro slévárenské účely a slitiny pro tváření. Specifickou skupinou jsou slitiny využívané pro práškovou metalurgii. Dělení hořčíkových slitin je dle způsobu výroby (lití, kování, atd.). Složení slitin se udává pomocí hlavních přísadových prvků především Al, Mn, Zn, kovy vzácných zemin aj., což může být určitou výhodou pro konstruktéry. Nejčastěji se vychází z americké normy ASTM, kde se používají následující symboly, které uvádí tabulka 3. [4]



Obr. 3 Porovnání vybraných mechanických vlastností slévárenských slitin Mg a slitin pro tváření [4]

Tab. 3 Označení prvků v Mg slitinách [13]

Písmeno	Legující prvek
A	hliník (Al)
C	měď (Cu)
E	kovy vzácných zemin (RE)
H	thorium (Th)
K	zirkonium (Zr)
L	lithium (Li)
M	mangan (Mn)
Q	stříbro (Ag)
S	křemík (Si)
W	yttrium (Y)
Z	zinek (Zn)
X	vápník (Ca)
J	stroncium (Sr)

Tab. 4 ukazuje, že se slitiny rozdělují také dle technologie zpracování. Např. nejčastěji používaná slitina pro tlakové lití je označována jako AZ91, což znamená, že je to slitina s 9 % hliníku a 1 % zinku. Celkové složení se udává zaokrouhlenými celými čísly. Upřesněním mohou být další písmena, která značí stupeň čistoty slitiny např. AZ91 A, B...E, nebo AZ63 A, AZ63 B. Tab. 5 značí podskupinu H, která je určena pro kategorii výrobků vyrobených jen metodou tváření. Rozšířenějšího označení tepelného zpracování hořčíkových slitin najdeme v tab. 6, která značí podskupinu T. [13]

Tab. 4 Označení zpracování slitin [13]

Hlavní rozdělení	Popis
F	Podle technologie výroby
O	Žíhaná rekrystalizovaná (jen pro kované produkty)
H	Deformačně zpevněné
T	Tepelné zpracování
W	Rozpouštěcí žíhání

Tab. 5 Podskupina H zpracování slitin Mg [13]

Podskupina H	Popis
H1, plus 1 nebo více číslic	Jen deformačně zpevněná slitina
H2, plus 1 nebo více číslic	Deformačně zpevněná a částečně žíhaná
H3, plus jedna nebo více číslic	Deformačně zpevněná a stabilizovaná

Tab. 6 Podskupina T zpracování slitin Mg [13]

Podskupina T	Popis
T1	Ochlazení a přirozené stárnutí
T2	Žihání (jen produkty lité)
T3	Rozpouštěcí žihání a deformace za studena
T4	Rozpouštěcí žihání
T5	Ochlazení a umělé stárnutí
T6	Rozpouštěcí žihání a umělé stárnutí
T7	Rozpouštěcí žihání a stabilizace
T8	Rozpouštěcí žihání, deformace za studena a umělé stárnutí
T9	Rozpouštěcí žihání, umělé stárnutí a deformace za studena
T10	Ochlazení, umělé stárnutí a deformace za studena

3.2.1 Slévárenské slitiny

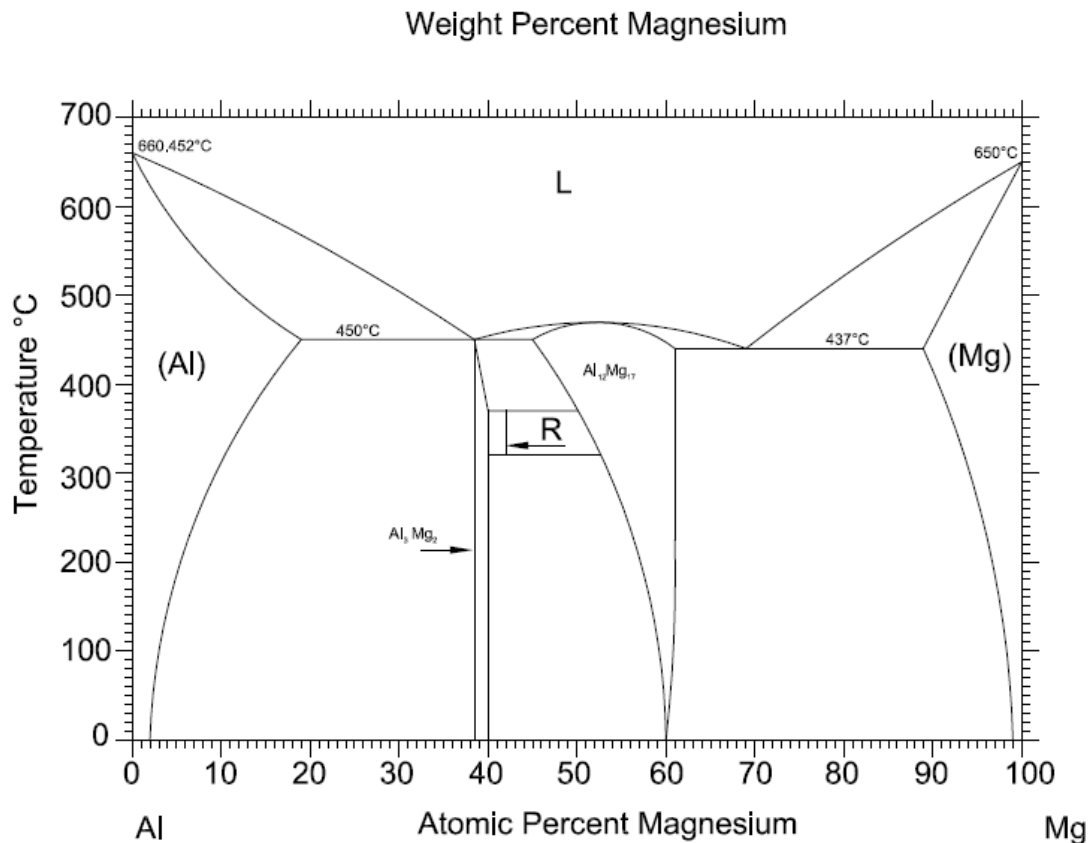
Jak už bylo řečeno, čistý hořčík se téměř nepoužívá, ale přidavkem vhodných prvků se jeho vlastnosti zlepšují a to jak technologické, mechanické nebo zvýšení odolnosti proti korozi. Převážná část hořčíkových slitin se zpracovává odléváním. Hlavním přísadovým prvkem je téměř výhradně hliník (slitina Mg-Al), ale také i zinek (slitina Mg-Zn), popř. lithium (Mg-Li) nebo (slitina Mg-Mn). Obsah hliníku se ve slévárenských slitinách pohybuje v rozmezí od 3 do 9 %. Popřípadě dalšími doplňkovými kovy mohou být Zr, Si, Th, Ag, Ti a KVZ [1]. Hořčíkové slitiny k odlévání mají větší množství přísad než slitiny pro tváření. Mají hrubé zrno a jejich krystalizace často probíhá odlišně od rovnovážného diagramu, čímž vznikají chemické nestejnorodosti, a proto je nutné tyto slitiny dlouhodobě homogenizačně žíhat pro zvýšení vrubové houževnatosti, kdy se odstraní eutektikum na hranicích zrn, které způsobuje křehkost po odlití. Po tomto cyklu může následovat ještě umělé stárnutí, které však nemá tak výrazné účinky jako u Al slitin. Na pevnosti se neprojeví, ale dojde k nárůstu meze kluzu. Je nutné mít na zřeteli, že hořčíkové slitiny jsou v tekutém stavu vysoce hořlavé, proto se musí dbát, aby byla tavenina chráněna vhodnou struskou nebo atmosférou. [5]

3.2.1.1 *Slitina Mg-Al*

Tyto slitiny jsou nejstarší skupinou slévárenských slitin hořčíku. Slitiny typu Mg-Al-(Zn, Mn) jsou nejvíce rozšířené pro slévárenské účely, obvykle ještě mohou obsahovat další legury jako Zr, Th, Ag a Ce. Přidáním dalších prvků jako Mn, Zn je možné změnit chemické složení, a tím i vlastnosti této slitiny. Užité vlastnosti těchto slitin jsou dány existencí relativně široké oblasti tuhého roztoku δ v rovnovážném diagramu Mg-Al. Hliník podstatně zvyšuje pevnost a tvrdost, zlepšuje slévárenské vlastnosti a zmenšuje smrštitost při tuhnutí.

Tuto slitinu tvoří rovnovážný diagram (obr. 4) se změnou rozpustnosti v tuhém stavu. Slitiny jsou tvořeny tuhým roztokem δ , příp. eutektikem ($\gamma+\delta$). Maximální rozpustnost hliníku v hořčíku je 12,7 % Al při eutektické teplotě 437 °C (eutektická koncentrace Al je 32,3 %). Při ochlazování z eutektické teploty se snižuje rozpustnost Mg a z tuhého roztoku precipituje na hranicích dendritických zrn intermetalická fáze $Mg_{17}Al_{12}$, která snižuje tvárné vlastnosti slitiny [8]. Na rozpustnost Al v tuhém roztoku δ a na polohu eutektického bodu má vliv rychlost ochlazování, modifikace a tlak při lití [13]. Obsah hliníku ve slévárenských slitinách bývá v rozmezí od 3 do 9 %, avšak s rostoucím obsahem Al se výrazně zvětšuje interval tuhnutí, a tím i šířka dvoufázového pásma. To má vliv např. u gravitačního lití, kdy je umocněn malý metalostatický tlak a dochází k tvorbě mikrostaženin a ředin. U slitin pro gravitační lití by obsah Al neměl překročit 5 %. Slitiny s vyšším obsahem Al než 6 % mohou být tepelně zpracovány a dochází u nich k tvorbě diskontinuálního precipitátu fáze $Mg_{17}Al_{12}$ a bývají doplněny malým množstvím zinku a manganu. Zinek ve slitinách Mg-Al se převážně rozpouští v hořčíku a rovněž se stává složkou precipitující fáze. Při určitém koncentračním poměru s hliníkem $Zn/Al = 1/3$ vzniká ve slitině Mg-Al-Zn intermetalická fáze T ($Mg_3Al_2Zn_3$).

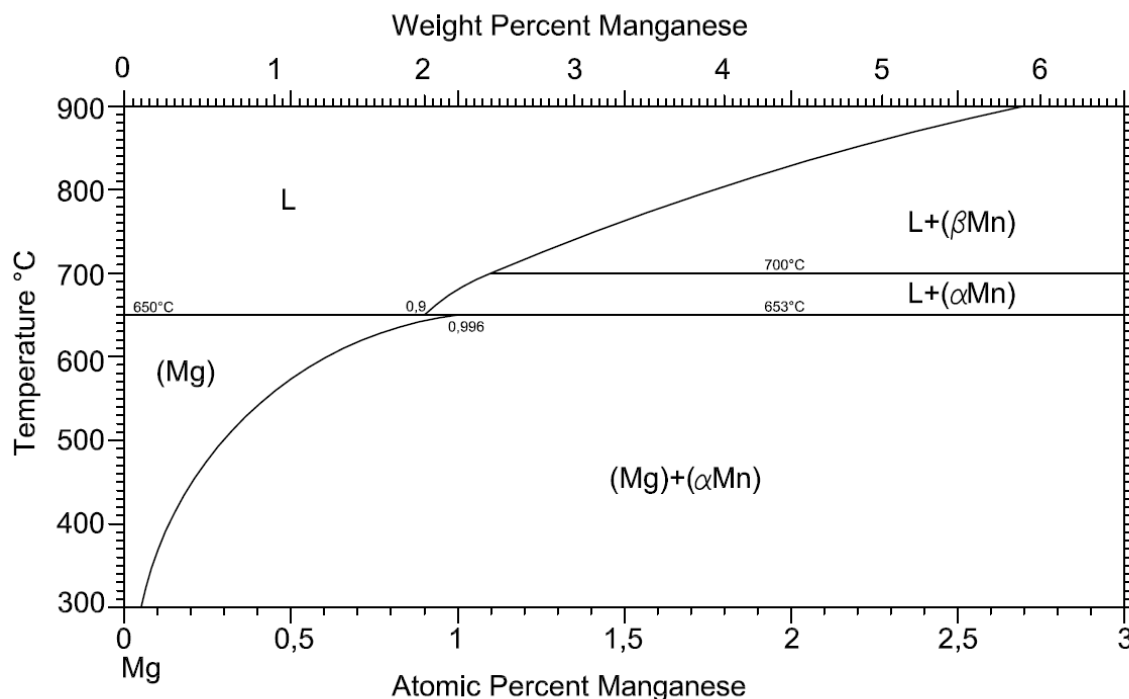
Nejrozšířenější z těchto slitin (s komerčním názvem elektron) jsou slitiny s obsahem 7 až 10 % Al, ze kterých se odlévají disky kol pro automobily. [11]



Obr. 4 Binární diagram Mg-Al [14]

3.2.1.2 Slitina Mg-Mn

Z fázového diagramu na obr. 5 je Mg-Mn neobvyklý oproti jiným hořčíkovým slitinám v tom, že má peritektickou reakci, ve které hořčík při 653 °C je tvořen z fáze $L+(\alpha\text{Mn})$ a rozpustnost Mn v pevném hořčíku je vyšší než v tavenině. Dochází tu k výrazné změně rozpustnosti s teplotou [4]. Pod křivkou solidu dochází k precipitaci fáze β , která je bohatá na mangan. Maximální obsah manganu bývá obvykle 1,2 až 2 hm. %, [13] mají zhoršené slévárenské vlastnosti, zato jsou svařitelné a mají vyšší odolnost proti korozi. Tyto slitiny mají tendenci tvořit hrubé zrno v průběhu krystalizace, proto jsou relativně nízké mechanické vlastnosti. Zrno lze zjemnit malými přídávky křemíku [11]. Tyto slitiny se používají např. pro aplikace, u nichž se vyžaduje vyšší tažnost a houževnatost. Snižuje se u nich obsah hliníku a zinek je nahrazován manganem v množství 0,2-0,6 % Mn.[8]



Obr. 5 Binární diagram Mg-Mn [14]

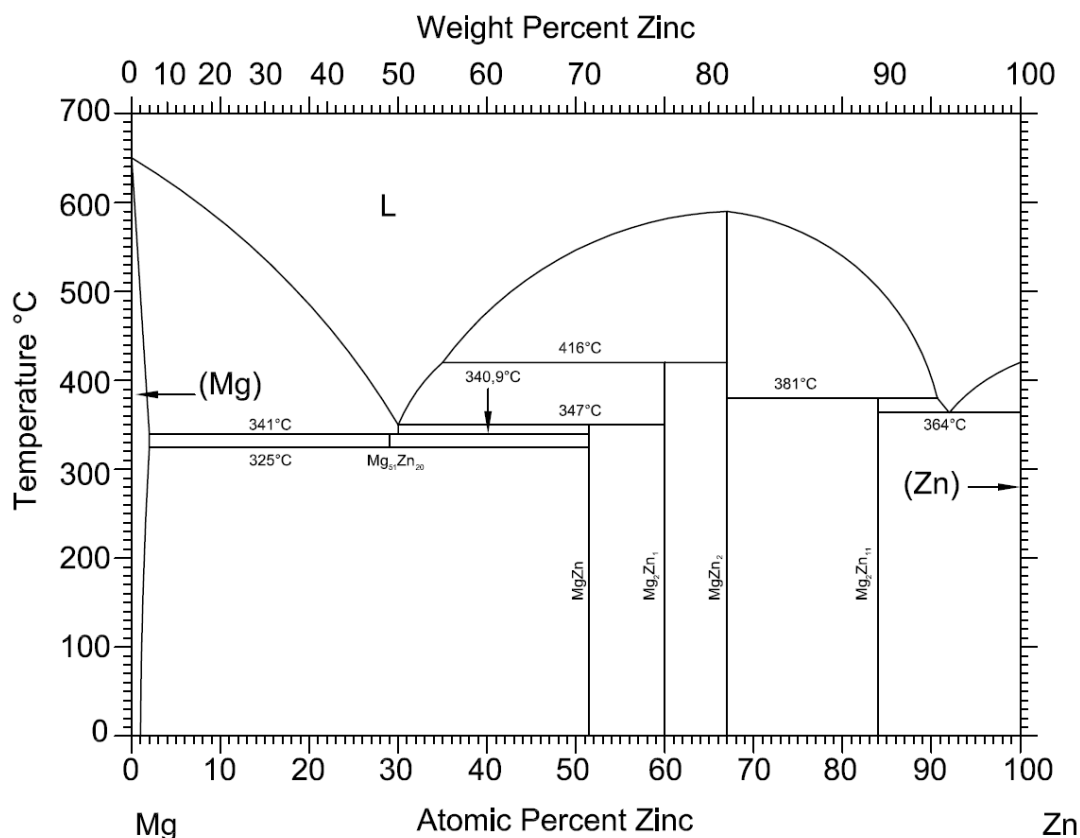
3.2.1.3 Slitina Mg-Zn

Z obr. 6 je patrná změna rozpustnosti s teplotou a ve slévárenských slitinách bývá obsah zinku od 0,3 do 5 %. Pod křivkou solidu se vylučují precipitáty fáze β (Mg_7Zn_3). Ty slitiny, které mají vyšší obsah zinku a obsahují i hliník, dochází k tvorbě precipitátů $\text{Mg}_3\text{Al}_2\text{Zn}_3$ (fáze T). Z hlediska strukturních složek se tyto slitiny podobají slitinám s hliníkem a zpracovávají se žiháním precipitačním vytvrzováním, tj. rozpouštěcím žiháním 380 °C/10h s ochlazením ve vodě. Stárnutí se buď vynechává (vzniká pouze přesycený roztok), nebo se výjimečně zařazuje stárnutí umělé. Vyšší obsah zinku sice umožňuje precipitační vytvrzování, ale zhoršuje slévárenské vlastnosti (vznik mikroporovitosti a praskání za vyšších teplot). Obsah zinku se u následujících slitin ustálil na hodnotě asi 5 % a obsah RE na 4 %. Technické slitiny hořčíku se zinkem se zpravidla používají společně s Mn, Zr, popř. i RE (kovy vzácných zemin). Mangan zvyšuje odolnost proti korozi. Tyto přísady zvětšují oblast použití slitin hlavně k vyšším teplotám (minimálně do teploty 300 °C) a výrazně ovlivňují mechanické vlastnosti.

Slitiny hořčíku, které obsahují zirkon, se dělí ještě na podskupiny [15]:

- 1) slitiny hořčíku se zinkem a RE - tyto slitiny mají např. lepší creepové vlastnosti než žárovevné slitiny hliníku, a to i při nižší měrné hmotnosti,
- 2) slitiny hořčíku s RE,
- 3) slitiny hořčíku s thoriem.

Z kovů vzácných zemin se pro legování těchto slitin používá zejména lantanidů (Ce, La, Pr), které mají s hořčíkem i podobný rovnovážný diagram se změnou rozpustnosti. Pod křivkou solidu precipituje velmi stabilní fáze $Mg_9(RE)$, která zajišťuje vysoké mechanické vlastnosti do pracovních teplot až 250 °C. Ve všech třech případech zirkon ovlivňuje zjemnění zrna, tím i jeho pevnostní charakteristiky a jeho obsah je 0,4-1 %. [11]



Obr. 6 Binární diagram Mg-Zn [16]

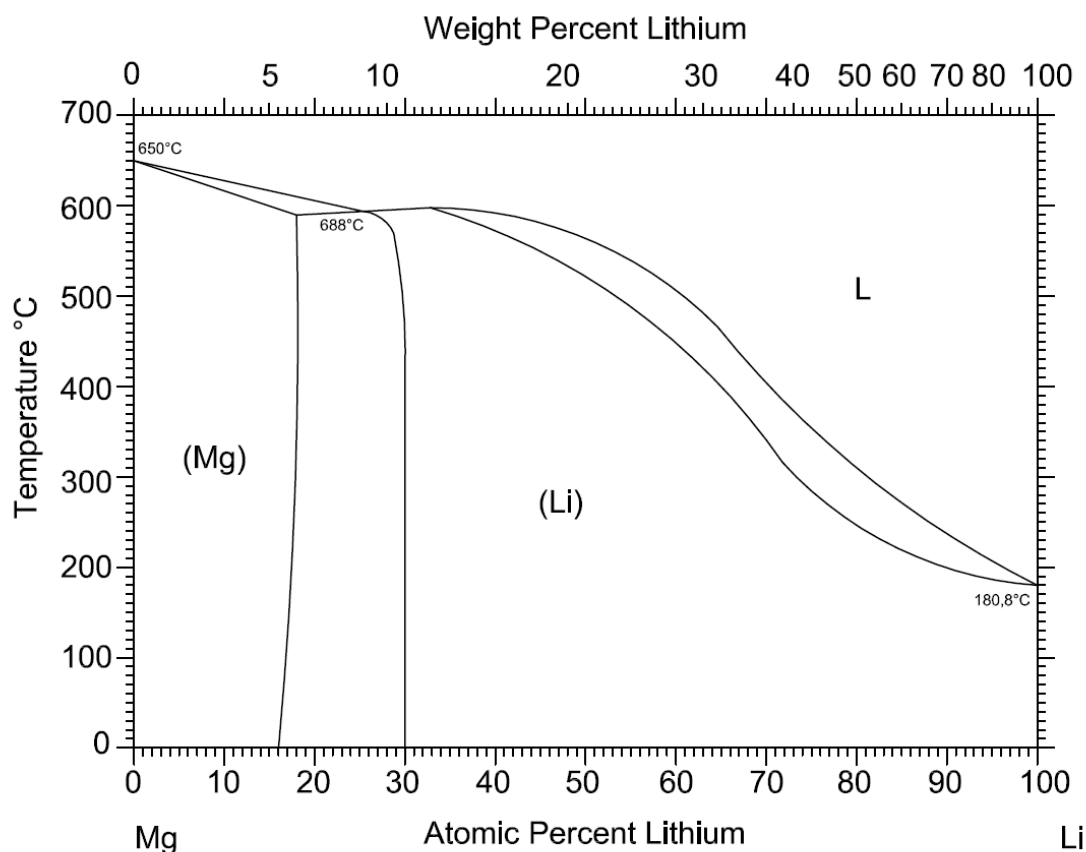
3.2.1.4 *Slitina Mg-Li*

Slitiny hořčíku s lithiem jsou technicky zajímavé, ale výrobně mimořádně složité. Patří mezi nejlehčí a perspektivní konstrukční materiály. Lithium je jediný legující prvek, který snižuje hustotu pod hodnotu hořčíku a to na 1300kg.m^{-3} až 1500kg.m^{-3} . Tyto slitiny můžeme rozdělit na binární (Mg-Li), nebo na slitiny vícekomponentní, které jsou legovány prvky Al, Zn, Si.

Binární slitiny mohou být podle obsahu lithia tvořeny:

- fází α (do 5,7 hm. % Li, hexagonální těsně uspořádaná mřížka),
- fází $\alpha+\beta$ (5,7-10,4 hm. % Li),
- fází β (nad 10,4 hm. %Li, kubická prostorově centrovaná mřížka).

S vyšším obsahem Li se pevnost slitin snižuje, ale modul pružnosti, mez kluzu v tlaku je vyšší než u ostatních hořčíkových slitin a tuhost je až asi pětkrát větší než mají hliníkové slitiny. Ale zatím jsou využívány jen ve vojenském letectví a kosmickém průmyslu skrz jejich vysokou cenu a mají i další nedostatky jako je velká chemická aktivita, poměrně malé pevnosti při teplotách nad $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ a malá odolnost proti tečení. Výroba Mg-Li je doprovázena i řadou metalurgických problémů, zejména v rozdílu tenzí par, rozdílu hustot a v rozdílu teplot tání obou kovů [17], avšak jejich intenzivní průzkum i nadále pokračuje a binární diagram je na obr. 7. [13, 4, 11]



Obr. 7 Binární diagram Mg-Li [14]

3.2.2 Slitiny pro tváření

Tvářitelnost je schopnost materiálu se plasticky deformovat, aniž dojde k jeho porušení. V případě, že je potřeba dosáhnout vyšších mechanických vlastností, je vhodné přejít na technologii zpracování tvářením, ale i tady jsou určité faktory, které omezují využívání těchto metod, jako jsou omezené počty vhodných slitin ke tváření, které se dále odráží v ceně dodávaných či vyráběných polotovarů. Dále hořčík krystalizuje v šesterečné soustavě s těsně uspořádanou mřížkou, která se vyznačuje malým počtem kluzových rovin. Z tohoto důvodu se u Mg slitin projevuje špatná tvářitelnost za studena, omezená tvarová složitost výrobků a nízká schopnost absorbovat rázovou deformaci. Ve stavbě automobilů se tváření Mg slitin spíše uplatní na prvky karoserie a podvozku než pro díly převodovky. Tvářitelnost lze ovlivnit několika způsoby např. chemickým složením, zásahem do struktury, zvýšením teploty tváření, či tváření všestranným tlakem. Důležité je při zásahu do struktury vytvořit jemnozrnnou strukturu, zlepšit homogennost a stejnorodost mikrostruktury, která bývá u Mg slitin špatná, poté získáváme vyšší mechanické vlastnosti. Nejčastějšími technologiemi tváření v průmyslovém měřítku je protlačování profilů, válcování desek, či plechů, popř. volné nebo zápusťkové kování. Protlačování je jedna z nejuniverzálnějších

metod pro zpracování všech druhů materiálů, projekt Magnextrusco [18] má za cíl vyrábět hydrostatickým protlačováním díly pro automobily, kola, železniční prostředky, které budou o 20-30 % lehčí než srovnatelné konstrukce z hliníku. Podle druhu technologie tváření se ohřev provádí v rozmezí 200 – 350 °C, kdy se aktivují dodatečné kluzné roviny. Horní hranici ohřevu bez ochranné atmosféry jsou teploty kolem 400 °C. Při teplotě přes 500 °C může docházet ke vznícení hořčíkových slitin.

Tvářecí teploty tedy leží v intervalech, pro:

- 1) kování 200 až 300 °C ,
- 2) protlačování 300 až 400 °C,
- 3) válcování 400 až 500 °C.

Slitiny pro tváření mají obvykle nižší obsah přísadových prvků, jelikož by se s rostoucím podílem legujících prvků zhoršovala tvářitelnost. Pro tvářené slitiny se nepoužívají jako legury kovy vzácných zemin.

Podle legujících prvků můžeme slitiny rozdělit na:

- Mg-Al-Zn

Slitiny s hliníkem mají obvykle přísadu Zn do 1,5 hm. % a některé i přísadu Mn, jelikož zvyšuje odolnost proti korozi.

- Mg-Mn

Slitiny s manganem mají nízké mechanické vlastnosti, dobrou korozní odolnost, dobrou tvárnost, svařitelnost a jsou výrobně i zpracovatelsky jednoduché. Vyrábějí se z nich výlisky a válcují plechy.

- Mg-Zn-Zr

Slitiny se zinkem a zirkonem mají vhodnou kombinaci legur. Zinek zvyšuje mechanické vlastnosti, zirkon zjemňuje zrna. Nejvyšší mechanické vlastnosti mají slitiny po precipitačním vytvrzení.

Poněkud specifické slitiny jsou slitiny s thoriem vyvinuté v Rusku. Tyto slitiny jsou vhodné pro vysoké teploty. Mechanické vlastnosti těchto slitin zůstávají stabilní až do teplot 350 °C. [11, 12]

3.3 Tavení slitin hořčíku

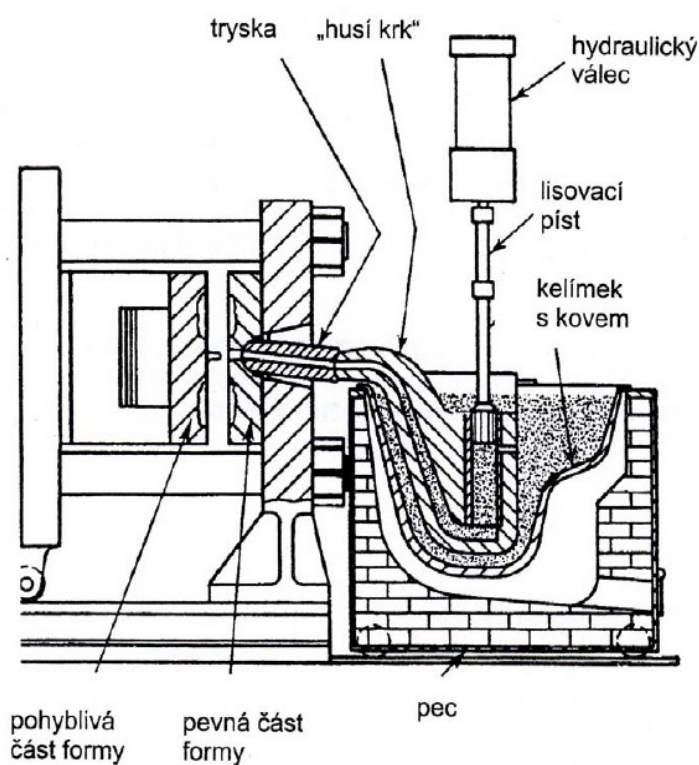
3.3.1 Technologie výroby odlitků

Hořčíkové slitiny se odlévají do pískových forem, do skořepin, do kokil, a to jak tlakovým litím tak i gravitačním. Z hlediska technologického i ekonomického je naprosto převažující technologií výroba tlakovým litím. Odlitky tohoto typu zvláště pro automobilový průmysl představují v současnosti největší a přitom stále rostoucí podíl v celkovém využití hořčíkových slitin. Nemalou roli zde hraje i technický pokrok v konstrukci licích strojů i tavicích agregátů. Nároky na přesnost dílů s co nejmenšími potřebami pro další opracování vedou k rozvoji nových technologických postupů, jako jsou rheocasting a thixocasting. Dalo by se říct, že klasické technologie lití hořčíkových slitin do pískových nebo kovových forem se odsunuje do pozadí, ale i přes relativní snižování podílu tohoto typu odlitků na celkové spotřebě se objem jejich výroby výrazně nemění. Stále si udržují své postavení jako technologie nejvhodnější pro lití malých sérií odlitků složitých tvarů (s nutností skládání jader) nebo velkých hmotností. [19]

3.3.1.1. Tlakové lití

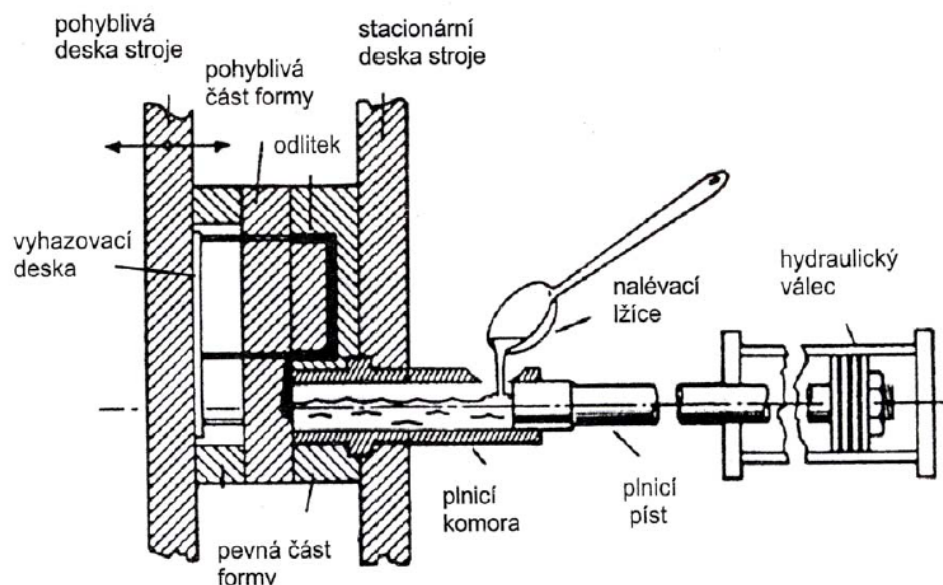
Tato metoda lití hořčíkových slitin se hojně využívá pro řadu technických výhod. Principem je vstřikování roztaveného kovu do dutiny kovové formy pod vysokým tlakem až 500 MPa. Odlitky lité do trvalých forem mají vysokou rozměrovou přesnost, možnost výroby tvarově složitých odlitků s předlitými otvory, kvalitní povrch s minimálními přídávky na obrábění, jemnozrnnou strukturu, a tím i vyšší mechanické vlastnosti. Slévárenské vlastnosti jsou při tlakovém lití výborné, proto dovolují odlévání i tenkostěnných odlitků, čím se snižují i náklady na materiál. Skutečnost, že hořčík nereaguje s ocelovými formami tak intenzivně jako hliník, zajišťuje vyšší životnost forem a umožňuje dělat formy s menšími úkopy. Není neobvyklé, že nástroj použitý na 500 000 cyklů, sloužící pro lití Mg slitin, si zachová výborný povrch a je stále možné na něm vyrábět bez nutnosti větších oprav. Velmi výhodné je odlévání do vakuových forem, jelikož při tlakovém lití Mg slitin je velká turbulence kovu a s tím spojena oxidace kovu během lití. Pokud se použije vakuum odpadá problém s oxidací kovu, i s odvodem plynů z formy během lití. Je k tomu však nutné příslušné zařízení se složitějšími formami, a tím i vyšší výrobní náklady. K lití se používají stroje s teplou nebo se studenou komorou. Zda použít komoru teplou nebo studenou, rozhoduje i hmotnost odlitku, ale více se používají stroje s teplou komorou. [21,20]

- Stroje s teplou komorou (obr. 8):
 - pro odlitky do 1kg
 - součástí je udržovací pec, v níž je teplá komora ponořena
 - kov se při transportu z lázně do stroje prakticky nedostává do styku s atmosférou
 - teplotní ztráty minimální



Obr. 8 Tlakový stroj s teplou komorou [8]

- Stroje se studenou lící komorou (obr. 9):
 - pro odlitky s vyšší hmotností než 1kg
 - kov je do stroje dávkován z externí udržovací pece
 - transport kovu se provádí tak, aby kov nepřišel do styku se vzdušnou atmosférou např. přetlak plynů nad hladinou, elektromagnetické pumpy, ponorné rotační pumpy atd.



Obr. 9 Horizontální tlakový stroj se studenou komorou [8]

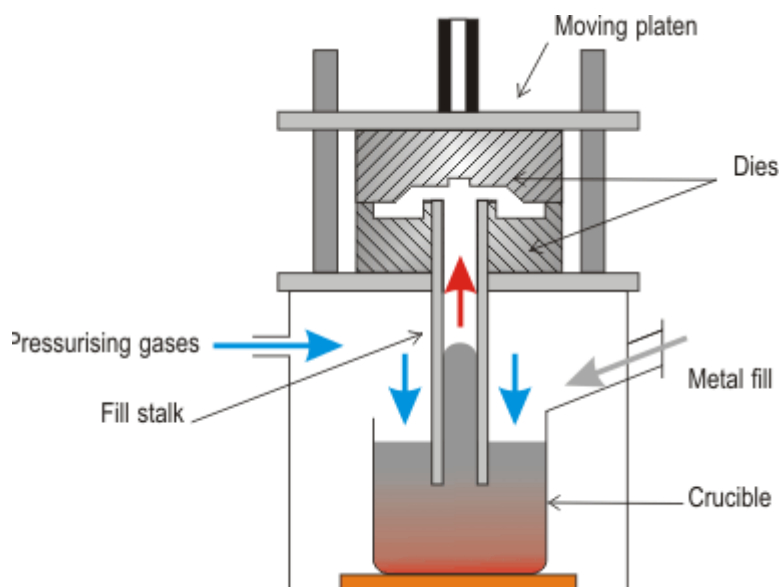
Nejčastěji používanou slitinou pro tlakové lití je slitina AZ91. Má vynikající zabíhavost a umožňuje odlévat tenkostěnné, tvarově velmi komplikované odlitky. Slitina má vysokou pevnost, ale pouze střední tažnost a rázovou houževnatost. Další slitiny pro tlakové lití jsou uvedeny v tab. 7

Tab. 7 Chemické složení slitin hořčíku pro tlakové lití [25]

Prvek %								
	Al	Mn	Zn max	Si max	Cu max	Ni max	Fe max	Ostatní
AZ91	8,3-9,7	0,15-0,5	0,35-1,0	0,10	0,03	0,002	0,005	0,02
AM60	5,5-6,5	0,24-0,6	0,22	0,10	0,01	0,002	0,005	0,02
AM50	4,4-5,4	0,26-0,6	0,22	0,10	0,01	0,002	0,004	0,02
AM20	1,6-2,6	min.0,1	0,2	0,10	0,01	0,002	0,005	0,02
AM41	3,5-5,0	0,35-0,7	0,12	0,50-1,5	0,02	0,002	0,0035	0,02
AM21	1,8-2,6	min.0,1	0,2	0,70-1,2	0,01	0,002	0,005	0,02
AE42	3,5-4,5	min.0,1	0,2	0,10	0,02	0,002	0,005	0,02

Další z variant, kterou můžeme použít, je nízkotlaké lití, i když se více používá u slitin hliníku, stále více byla poptávka i po nízkotlakém lití pro slitiny hořčíku. A proto např. firma Kurtz GmbH [22] upravila své nízkotlaké stroje i pro odlévání hořčíkových slitin. Princip metody spočívá v tom, že odlévání se provádí zvýšením tlaku nad hladinou kovu, čímž je kov

z kelímku vytlačován stoupací trubicí vzhůru do formy (obr. 10). Výhodou je cílené ovládání rychlosti lití, klidné plnění formy, vysoké využití tekutého kovu v odlitku aj.



Obr. 10 Stroj na nízkotlaké lití [22]

3.3.1.2. Gravitační lití do pískových forem

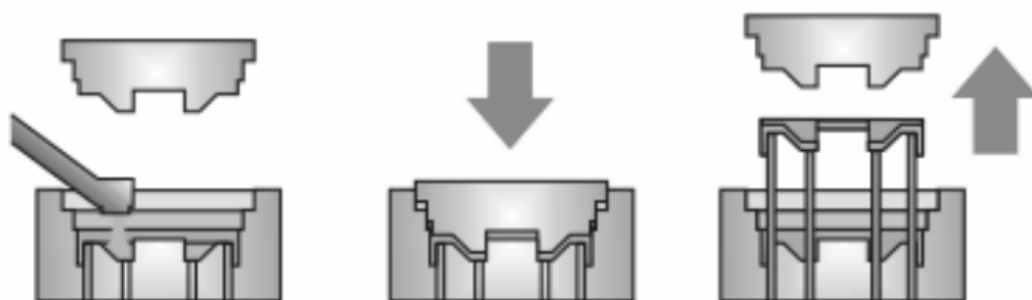
I při lití hořčíkových slitin do pískových forem se dá dosáhnout vysoké jakosti odlitků a to závisí především na zvládnutí přípravy, ošetření taveniny a vhodném výběru pískové směsi pro výrobu forem a jader. Jak už bylo řečeno, tato technologie se používá v podstatně menším měřítku než je tlakové lití, ale i tak má své postavení v kusové a malosériové výrobě speciálních odlitků. Odlévá se gravitačně, při čemž je nutno dbát po celou dobu na ochranu kovu před oxidační atmosférou. Používá se např. prášková síra, kterou se zaprašuje při lití proud kovu, ale také se přidává do formovacích směsí. Nevýhodou gravitačního lití je špatná dosazovací schopnost kovu při tuhnutí, způsobená širokým intervalem tuhnutí a malým dosazovacím tlakem. [8, 19]

3.3.1.3. Speciální technologie odlévání

Přestože je technologie tlakového lití na vysoké úrovni, jsou neustále snahy tuto technologii zdokonalovat a používat nové typy slitin se speciálními vlastnostmi a nové zdokonalené modifikace, jako např. thixocasting, rheo casting, squeeze casting atp. [23]

- **Lítí s krystalizací pod tlakem – Squeeze Casting**

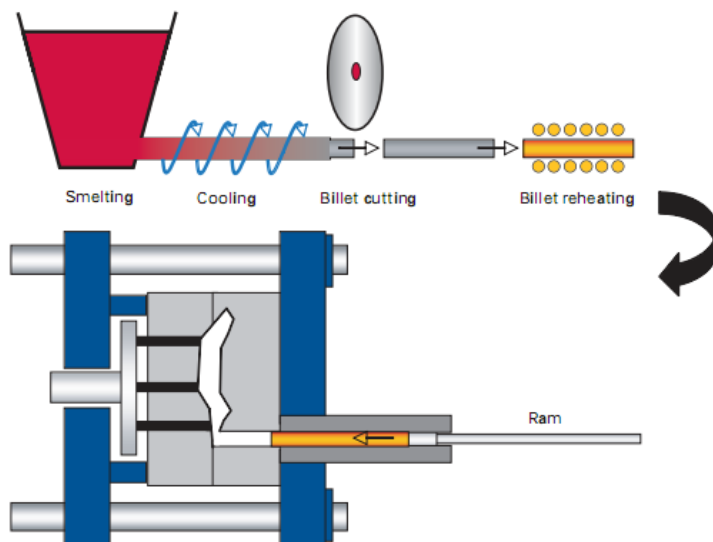
Dle [8] je metoda progresivní, dosud málo rozšířenou metodou lití do kovových forem, která v sobě kombinuje výhody pomalého plnění formy a vysokého tlaku během tuhnutí. Podle způsobu provedení se provádí tzv. přímý nebo nepřímý squeeze casting. Lisovací tlak působí u obou během celé doby tuhnutí. V přímém Squeeze Castingu podle obr. 11 se přesně odměřená dávka kovu nalije do spodní části kovové formy připomínající raznici. Kov se uzavře a stlačí horní částí formy (razníkem). Tlak působí po celou dobu tuhnutí. Po ztuhnutí se odlitek pomocí vyhazovačů vytlačí z formy. Metoda je vhodná pro výrobu relativně masivních odlitků. U nepřímého Squeeze Castingu připomíná způsob lití se studenou komorou. Kov se dává do komory lisu pod vlastní kovovou formou. Válec se vrátí do pracovní polohy a kov se velkými zářezy malou rychlostí vytlačuje do formy. Rychlost proudění je malá, řádově 0,5 m/s kov proto proudí laminárně, nedochází k jeho víření a oxidaci. [24]



Obr. 11 Výrobní postup při přímém squeeze castingu [8]

- **Thixocasting**

Dle [8] je Thixocasting novou progresivní metodou, která je svým charakterem na pomezí mezi odléváním a lisováním. Principem metody je zhotovení výchozích těles vsázky, hmotností odpovídajících konečnému výrobku, ohřev každého takového tělesa do teplotní oblasti mezi solidem a likvidem, následuje vložení do lisovací komory tlakového stroje a vtlačení materiálu do dutiny kovové formy. Celý postup je znázorněn na obr. 12.



Obr. 12 Výrobní postup při metodě thixocasting [25]

- **Metoda Semi Solid Metalworking**

Je to proces založený na speciálně upravené konzistenci materiálu (např. jemné granule slitiny Mg), který se při vstřikování do tlakové formy převádí do polotekutého stavu (teplota mezi likvidem a solidem) podobného konzistenci „horké plastelíny“. Výhodou je získání odlitku bez staženin a globulární struktura. [24]

3.3.2 Praktické zásady

Vzhledem k mimořádně vysoké afinitě hořčíku ke kyslíku musíme brát ohledy při tavení a manipulaci s tekutým kovem. Těto vlastnosti musí být přizpůsobena jak konstrukce pece, vedení tavicího procesu, tak i transport taveniny do forem.

Proto je třeba dodržovat některé zásady:

- tavení musí probíhat pod vrstvou ochranné strusky nebo v inertní atmosféře
- při dopravě kovu zabránit kontaktu se vzduchem a zejména s jakoukoli formou vlhkosti, vlhkost se při styku s tekutým kovem rozkládá a hrozí znečištěním taveniny vměstky, případně explozí. Hořčík v přímém kontaktu se vzduchem je hořlavý.
- během tavení bez použití krycích solí se vytváří na hladině vrstva oxidů, ty se musí v určitých intervalech odstraňovat
- nářadí, které se používá k tavení, musí být vysušeno a opatřeno nátěrem
- pokud se tekutý kov v peci udržuje několik dnů, neměla by teplota lázně klesnout pod teplotou likvidu
- vsázka, která se přidává do lázně, musí být předeheřtá.

Vsázkové suroviny pro tavení hořčíkových slitin jsou dodávány v podobě housek, bloků s požadovaným chemickým složením. Dodavatelských zdrojů Mg bloků je řada, ale je velmi důležité posoudit jakost a to nejen podle atestu chemického složení, ale i obsah oxidů tj. metalurgickou čistotu. Ze zkušeností slévárny Kovolit, a.s. Modřice existují velké rozdíly v jakosti dodávaných Mg bloků. [26]

Součástí moderních pecí je předehřívací jednotka. V ní se vsázka předehřívá na teplotu asi 150 °C. Tavicí kelímky a jejich vyzdívka musí být voleny s ohledem na chemickou reaktivnost hořčíku. Na rozdíl od hliníku nereaguje hořčík se železem. Proto se hořčíkové slitiny často taví v ocelových kelímcích z uhlíkaté nebo nízkolegované oceli bez obsahu niklu. Stav kelímků se musí pravidelně kontrolovat. Pro vyzdívku pece a prostředků pro transport pece nelze v místech, které jsou v přímém kontaktu s kovem, v žádném případě použít vyzdívkové materiály na bázi křemičitanů. Používá se keramika na bázi oxidů hořčíku nebo vysoce-hlinitanové žáruvzdorné hmoty.[8]

Ochrana hladiny kovu proti oxidaci se provádí:

- tavicími, rafinačními a krycími soli (CaCl_2 , NaCl , KCl , MgCl_2 , CaF_2 , MgO)
- sírou
- beryliem
- inertními plyny (SO_2 , SF_6 , CO_2 , Ar)

Tavicí soli se používají od počátku průmyslového lití hořčíkových slitin. Jejich složení se postupně měnilo a poupravovalo skrz poznání jejich vlivu na výsledné vlastnosti odlitků. V důsledku vysoké afinity hořčíku ke kyslíku je výběr omezen na chloridy a fluoridy alkalických kovů nebo kovů alkalických zemin. Prvními tavicími přísadami byly MgCl_2 , NaCl , CaF_2 . MgCl_2 účinně absorbuje MgO a vytváří hustou kaši, která klesá ke dnu kelímku. Soli jsou totiž obvykle těžší než hořčík, proto postupně klesají ke dnu lázně. Nevýhodou MgO je, že pokud není tavenina dokonale zbavena zbytků chloridu, zvyšuje se náchylnost výsledného odlitku ke korozi. Proto musí následovat rafinace taveniny. To znamená, že se musí odstranit z taveniny nežádoucí nečistoty, především oxidy a chloridy. Rafinační soli jsou směsí chloridů, popř. fluoridů vápníku, hořčíku, sodíku a draslíku v různém poměru a používají se ve fázi úplného roztavení vsázky při intenzivním míchání taveniny. Některé soli dokáží vázat vměstky a provádí tak i zároveň rafinaci taveniny. Byly vyvinuty i speciální krycí soli, které neobsahují chloridy a vytvářejí rovněž viskózní krycí vrstvu na povrchu taveniny (směsi B_2O_3 - $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$). [8,19]

Další ochranou taveniny může být prášková síra, o které je popsáno už v kapitole odlévání do pískových forem. Pro snížení vznítivosti někteří metalurgové také doporučují přísadu berylia 0,005 až 0,2 % [15] nebo přísadu 0,2 % vápníku. Vyšší obsah vápníku však zhoršuje odolnost proti korozi.

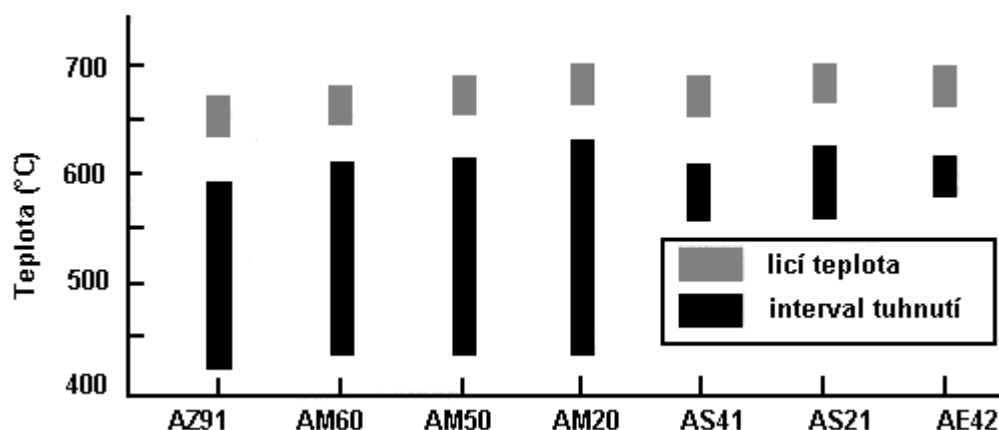
Jiným bráněním přístupu vzduchu k tavenině hořčíku je použití ochranné atmosféry. Prvním krokem bylo použití SO_2 pro ochranu proudu taveniny při lití nebo povrchu taveniny ve vtokové soustavě slévárenské formy. Tato varianta přináší možnost dlouhodobého ochranného účinku a ochranná vrstva je i méně náchylná k porušení své celistvosti, avšak má to také své nevýhody, více méně ekologického rázu. Uvolňuje silný zápach, má nepříznivý vliv na zdravotní bezpečnost pracovního prostředí a také se rychleji opotřebovávají výrobní zařízení, skrz uvolňování kyselinotvorných oxidů síry. Koncem 70. a v 80. letech přišel na trh čistý a nezapáchající SF_6 , který skýtal i dobrou ochranu zdraví při práci. Pro svou účinnost a nenáročnost na manipulaci ve spojení se zdravotní nezávadností si tato technologie udržovala postavení až do konce minulého století. Výhrady proti jeho používání přišly z rozšiřujícího se výzkumu ekologie, jelikož SF_6 přispívá ke globálnímu potenciálu oteplování téměř 2400krát více než CO_2 a k tomu má ještě velmi dlouhou životnost v atmosféře-3200 let. Jeho použití podléhá ekologickým předpisům a je snahou ho nahrazovat jinými plyny. Např. byla zkoumána i možnost využití BF_3 , ukázalo se, že je stejně účinný jako SF_6 , bohužel nebyl doporučován především kvůli jeho toxicitě a vysoké ceně. Další reakcí bylo i zpětné používání SO_2 s modernizací zařízení i postupů omezujících průvodní nepříznivé vlivy. U moderních tavících agregátů se používá k ochraně hladiny hlavně plynné atmosféry. Nad hladinu taveniny se přivádí plyn nebo směs plynů, které s hořčíkem reagují tak, že brání vzniku oxidů. Nejčastěji se používá směs plynů $\text{SF}_6 + \text{N}_2$ nebo $\text{SF}_6 + \text{CO}_2$. [8, 19]

3.3.3 Tavení

Tavení se provádí v:

- elektrických odporových pecí
- indukčních pecí
- méně pak v plamenných pecích s vytápěním plynem nebo topným olejem.

Jednoznačně jsou nejvýhodnější pece odporové, dochází v nich k minimálnímu pohybu taveniny a lze velmi přesně regulovat teplotu. Tavící pece jsou konstruovány jako dvou, příp. až tříkomorové. Doprava tekutého kovu z tavící pece do licích strojů se opět provádí tak, aby kov nepřišel do styku se vzdušnou atmosférou. Při tavení a manipulaci s kovem se musí dbát na zabezpečení proti požáru. K uhašení se používá naprosto suchý písek nebo krycí soli. Voda, pěna, CO_2 ani tetrachlor se nesmí použít! Tavící teploty se volí podle typu slitiny a podle velikosti odlitku a tloušťky stěn. Licí teploty a intervaly tuhnutí jsou uvedeny v následující tab. 8. [8]



Tab. 8 Interval tuhnutí a licí teploty některých slitin hořčíku [8]

3.4 Použití hořčkových slitin

Kovového hořčíku bylo prvně užito jako pyrotechnické směsi a později jako zdroj oslnivého světla při fotografování [5].

Využití hořčíku, ať už jako slitiny nebo jiné formy, je velmi široké. Např. jako legura ve slitinách hliníku, při výrobě litiny s kuličkovým grafitem, ochrana proti elektrochemické korozi, redukční látka při výrobě titanu, zirkonu, hafnia a uranu, anebo se také používá k odstranění síry ze železa a oceli [6].

Hořčíkové odlitky se používají v mnoha obchodních odvětvích, v současné době je to nejvíce automobilový průmysl, ale i v letectví a také v předmětech domácí potřeby, v elektronickém průmyslu.

V automobilovém průmyslu ze začátku používali slitiny hořčíku na interiérové prvky jako středový panel, palubní deska, rámy sedadel, volant atd. V poslední době je čím dál více kladen důraz na životní prostředí a to třeba skrz snižování emisí CO_2 v automobilovém průmyslu. Jeden způsob, jak snížit emise, je snížit spotřebu paliva a to souvisí se snížením hmotnosti auta. Také proto čím dál více nalézají slitiny hořčíku použití v tomto odvětví pro svoji nízkou hustotu $1,74 \text{ g.cm}^{-3}$ v kombinaci s dobrými pevnostními vlastnostmi. Začali se používat části na střešní panely, sestavy pro vnitřní potrubí, olejové vany i bloky motorů, výrobu karoserie, řízení a součásti pohonu a přenosu sil, převodové skříně aj. Další možností je použití litých kol; jejich předností je nízká hmotnost a vysoká tuhost. [27]

V leteckém průmyslu, vojenském letectví i v kosmickém průmyslu se používají slitiny Mg všude tam, kde se součástky otáčejí velkou rychlostí a je třeba malou hmotností zmenšit setrvačnou sílu.

V elektronickém průmyslu se využívají na kryty mobilních telefonů, počítačové komponenty, těla videokamer, přenosné nástroje aj.



Obr. 13 Obecná použití slitin hořčíku [22, 28, 29]

4. ČÁST EXPERIMENTÁLNÍ

Tato práce se zabývá ovlivněním tuhnutí a krystalizace hořčíkových slitin. Zaměřila se na komerčně dodávané slitiny AZ91, AMZ40, AJ62, AM60 a srovnání s čistým Mg. V mém případě se porovnávají křivky chladnutí ovlivněných a neovlivněných slitin a čistého Mg. Naměřené hodnoty byly porovnány s teoretickými předpoklady. Vliv očkovaní byl sledován na metalografických výbrusech.

4.1 Příprava materiálu

Všechna měření se prováděla na pracovišti katedry slévárenství na VŠB-TU Ostrava. Materiály a jejich složení, které se vybraly pro mou diplomovou práci – jsou uvedeny v tab. 9.

Všechny slitiny i čistý Mg byly dodány ve formě housek. Čistý Mg se dodává o různých čistotách, v našem případě bylo použito Mg o čistotě 99,95 %.

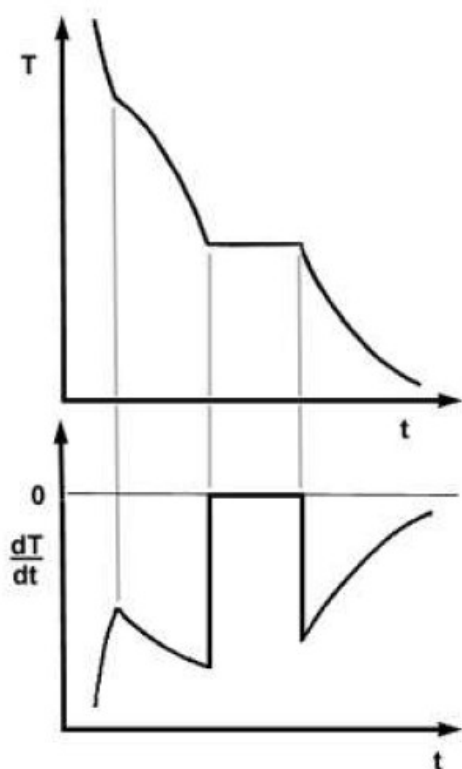
Tab. 9 Chemické složení připravených hořčíkových slitin

Prvek %										
	Zn	Al	Si	Cu	Mn	Fe	Ni	Ca	Be	Sr
AZ91	0,56	8,80	0,06	0,004	0,20	0,004	0,001	0,000	0,0007	0,000
AMZ40	0,14	3,76	0,02	0,001	0,34	0,003	0,000	0,000	0,0011	0,00
AJ62	0,01	5,78	0,04	0,001	0,35	0,003	0,001	0,008	0,0006	2,92
AM60	0,09	6,0	0,03	0,001	0,29	0,003	0,001	0,000	0,0008	0,000

4.2 Termická analýza a její derivace

Termická analýza by měla být používána v každém provozu pro průběžnou kontrolu kvality tekutého kovu. Klasická termická analýza je jednoduchá a rychlá. Touto metodou se vyhodnocují křivky chladnutí v intervalu krystalizace kovů a slitin, které jsou doprovázeny tepelným efektem. V praxi se používá zejména pro stanovení teploty tání a tuhnutí, popř. dalších charakteristických teplot, k posouzení očkovacího účinku, k zjištění stupně modifikace atd. Je založena na registraci uvolňovaného nebo pohlcovaného tepla při fázové přeměně, měří se v závislosti teplota – čas (obr. 14) tak, že vzorek roztavené slitiny se odlije do zkušebního kelímku přesným a citlivým termočlánkem se měří průběh křivky chladnutí. Probíhající fázové přeměny se projevují na křivkách typickými anomáliemi. Pokud jde o čistou látku, v našem případě čistý hořčík, měla by se na křivce objevit izotermická prodleva, počátek a konec krystalizace tuhého roztoku se projeví zlomem, což odpovídá

změně rychlosti ochlazování, resp. ohřevu. Pro sledování fázových přeměn v tuhém stavu, je metoda méně citlivá. Pro snadnější vyhodnocení jednotlivých teplotních bodů se využívá křivky derivace teploty, tedy závislost dT/dt (obr. 14). [30]



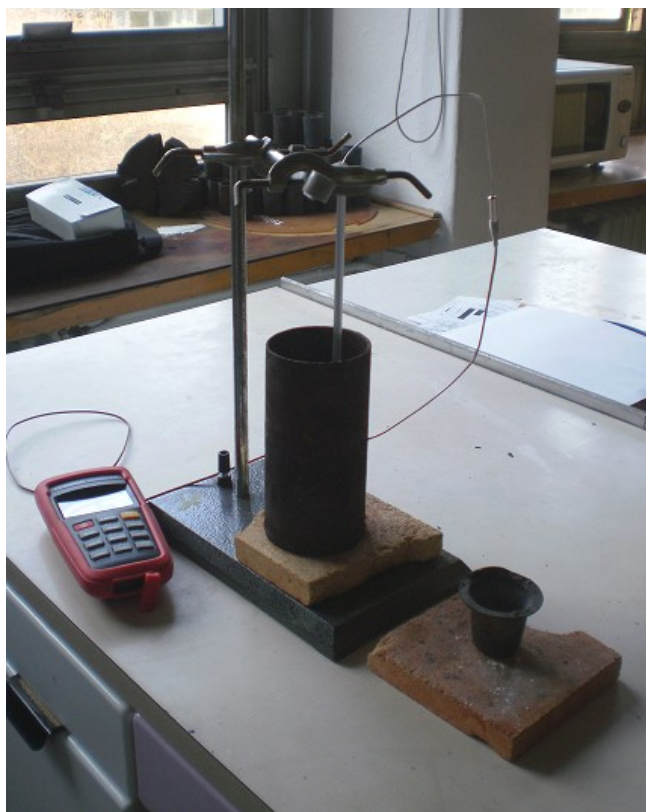
Obr. 14 Křivka ochlazování a její derivace [31]

4.2.1 Příprava zařízení

První pokusy o změření probíhaly v zařízení TA 110 od firmy MK technology určeném pro termickou analýzu hliníkových slitin. Tato metoda se projevila jako nevhodná, z důvodu malého objemu kovového kelímku, ve kterém je sledována teplota, neboť malé množství hořčkové slitiny ztuhlo velmi rychle a zařízení TA 110 nebylo schopno termickou analýzu změřit. Tudíž musel být sestaven laboratorní stojan pro ustavení tavicího kelímku o větším objemu nataveného kovu tak, aby vyhovoval našemu měření a pro uchycení ochrany termočlánek. Jako tavicí kelímek se použilo svařence z ocelové trubky průměru 75mm a délky 15mm. Také se musel připravit termočlánek, který byl ponořen do taveniny v ochranné trubici z křemenného skla pro opakované použití.

Pro můj experiment bylo použito na termickou analýzu přenosného digitálního teploměru Omega HH806AWE, který byl opatřen plášťovaným termočlánekem typu K takéž od firmy Omega, jehož rozsah měření je od $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ až do $1372\text{ }^{\circ}\text{C}$. Digitální teploměr dovoluje měření bez počítače se zápisem naměřených hodnot do vnitřní paměti přístroje a nebo s přímým napojením na počítač, kde lze sledovat křivku chladnutí na monitoru

s možností zápisu hodnot. Zapisování hodnot jsme nastavili na nejnižší možný čas a to po jedné sekundě. Experimentální sestava (stojan, digitální teploměr, termočlánek a tavící kelímek) byl doplněn o malý kovový kelímek pro odběr vzorků na metalografické výbrusy (obr. 15).



Obr. 15 Měřicí aparatura s kelímkem, do něhož byl připevněn termočlánek

4.2.2 Tavba

Než se začalo tavit, vše muselo být dokonale připraveno, jelikož hořčík je znám pro svou velkou afinitu ke kyslíku, musely se dodržovat všechny praktické zásady, které k tomu patří. Nachystala se jak prášková síra na zaprašování kovu, krycí sůl, tak i suchý písek, kdyby byla potřeba hořčík uhasit.

Tavení probíhalo v komorové elektrické odporové peci typu Vulcan 3-550 (obr. 16), která byla pro naše účely plně dostačující, nastavená teplota byla 750 °C. Vsázka se vždy zvážila a vložila se do kelímku, nakonec byla zasypána krycí rafinační solí Emgesal, aby se zajistila ochrana kovu při tavení. Vždy se tavila nejdříve slitina neočkováná, jakmile se natavilo, kelímek byl s roztaveným kovem vytažen a byl odlit vzorek do malého kovového kelímku pro metalografickou analýzu. Poté byl velký kelímek s kovem rychle ustaven do stojanu, kde se doprostřed taveniny spustil termočlánek v ochranné trubici z křemenného skla a byl spuštěn záznam termické analýzy. Teplota kovu na počátku měření byla dodržována na

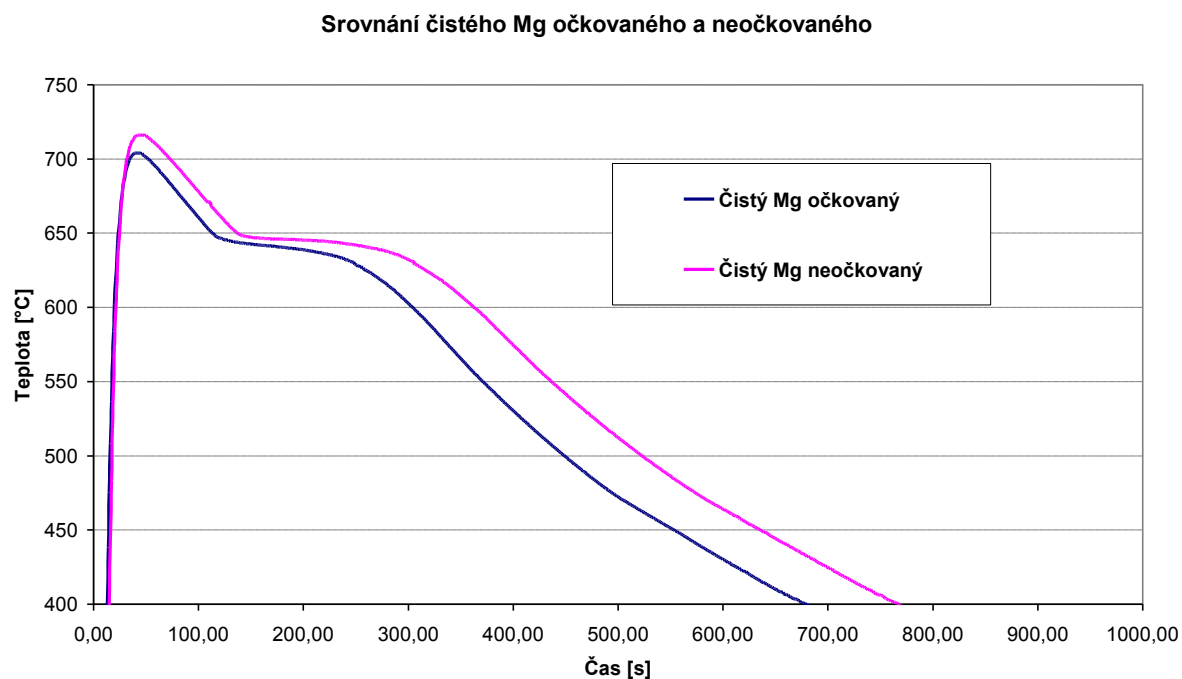
hodnotě 700 ± 5 °C. Pro zabránění oxidace hořčíku při chladnutí byla nachystána prášková síra. Jakmile kov zchladl pod 300 °C byl zpětně vložen do pece pro roztavení kovu, který byl dále použit pro očkovaní přípravkem Mikrosal Mg T 200, který se dodává ve formě velkých tablet (1tableta=50kg taveniny), který má za úkol zjemnit zrno a je na bázi hliníku pro slitiny hořčíku. V našem případě se použilo na 200g kovu 1 % tohoto přípravku, který se musel vložit do alobalu, aby se očkovaadlo lépe dostalo do kovu a nezůstávalo jen na povrchu. Poté byl ještě kov vložen do pece, aby se zvýšila teplota taveniny na požadovaných 700 ± 5 °C. Jakmile byl kov připraven, probíhalo vše stejně jako u slitiny nemodifikované a totéž se opakovalo u všech sledovaných slitin.



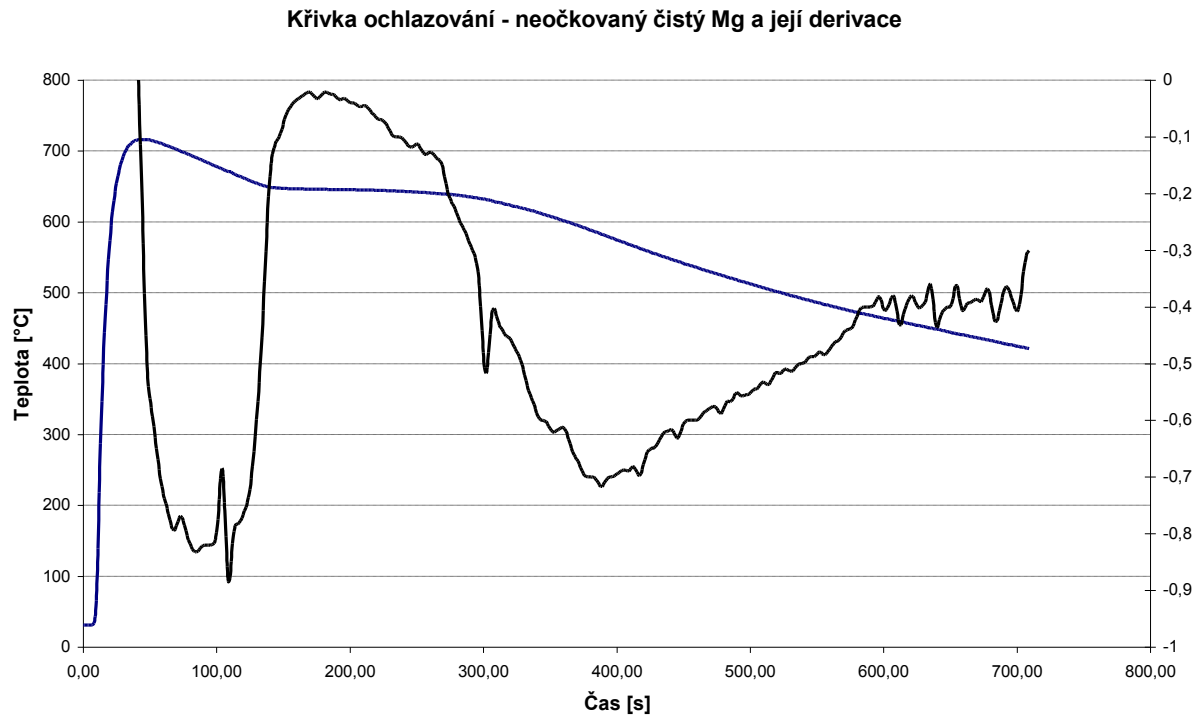
Obr. 16 Komorová elektrická odporová pec typu Vulcan 3-550

4.2.3 Grafické znázornění křivek ochlazování a jejich derivace

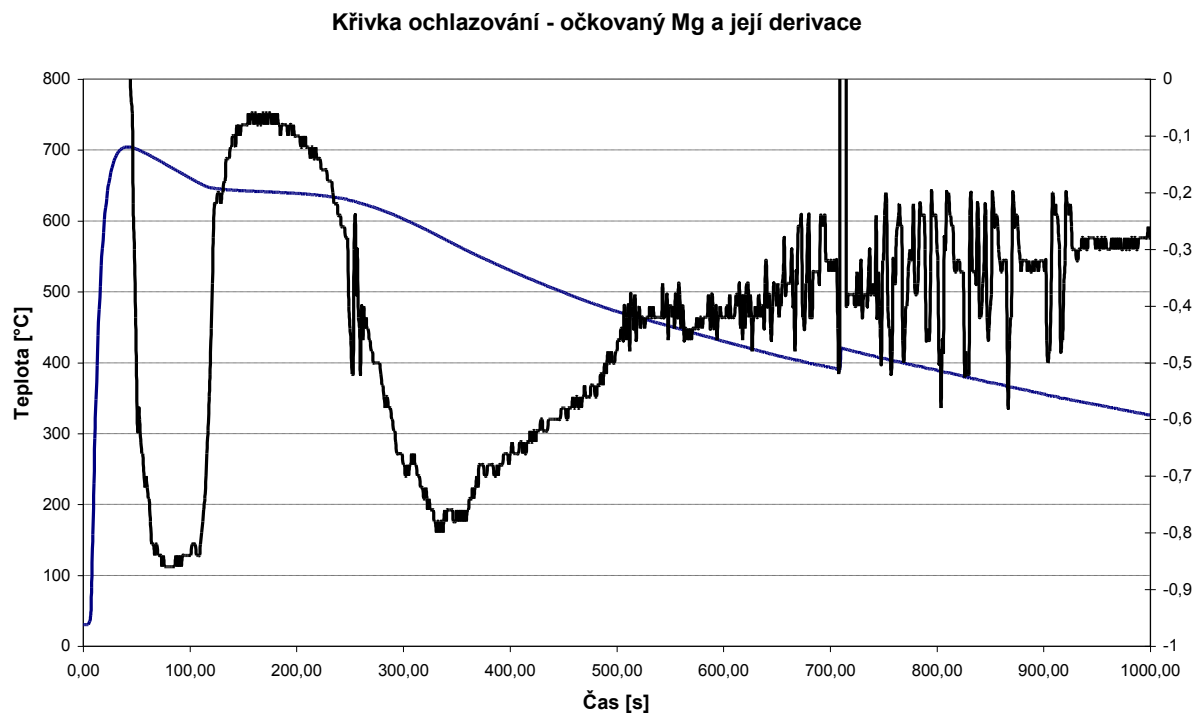
Poté se naměřená data z digitálního teploměru Omega HH806AWE zpracovala do grafů softwaru Microsoft Excel. Získané křivky ochlazování jsou v následujících obrázcích 17 až 31, v grafu je vždy srovnání očkované a neočkované slitiny i s derivacemi.



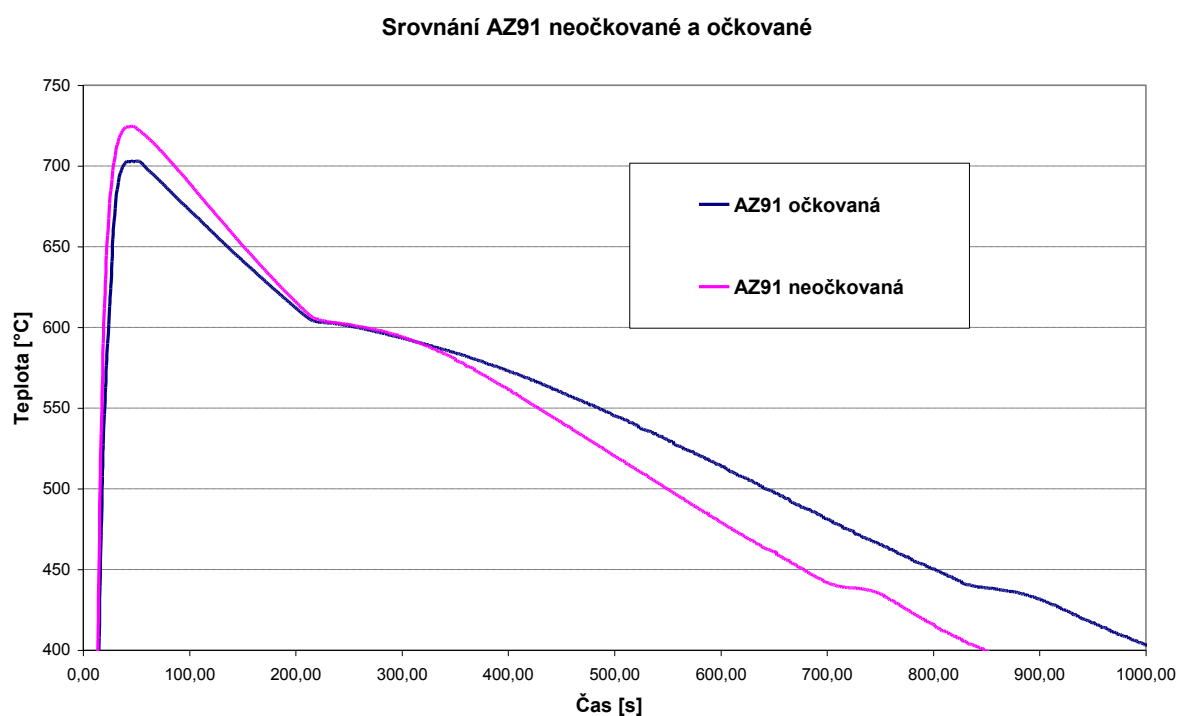
Obr. 17 Srovnání čistého Mg očkovaného a neočkovaného



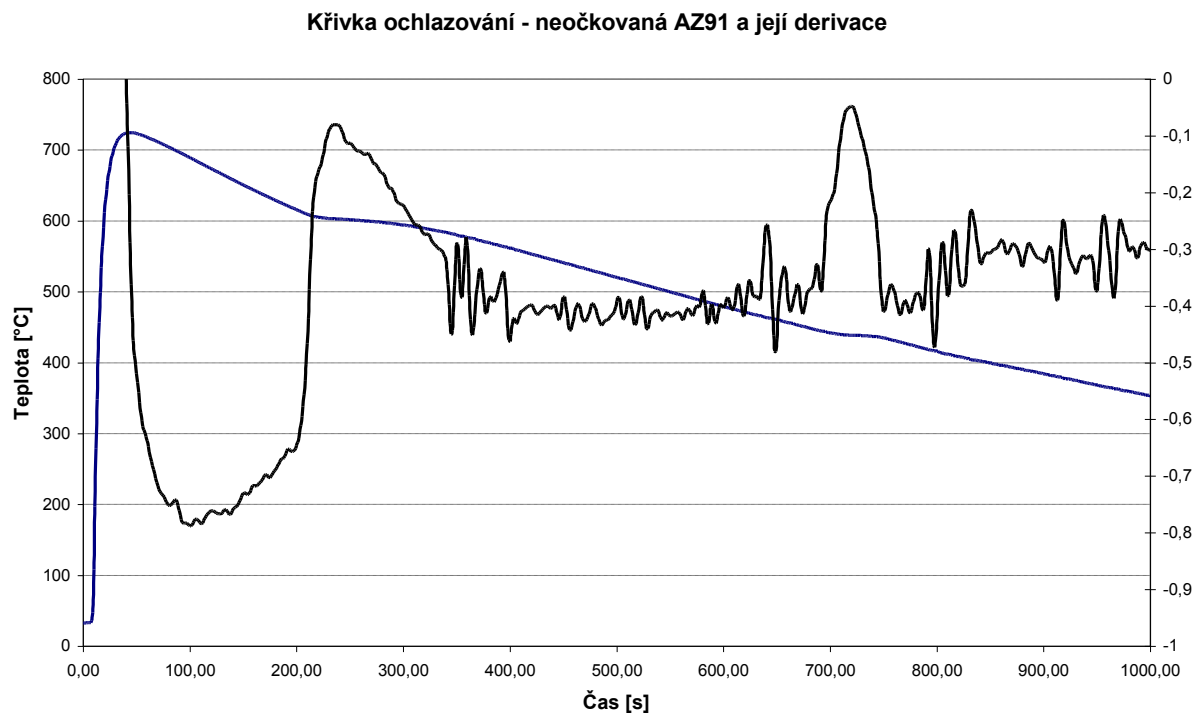
Obr. 18 Křivka ochlazování - neočkovaný čistý Mg a její derivace



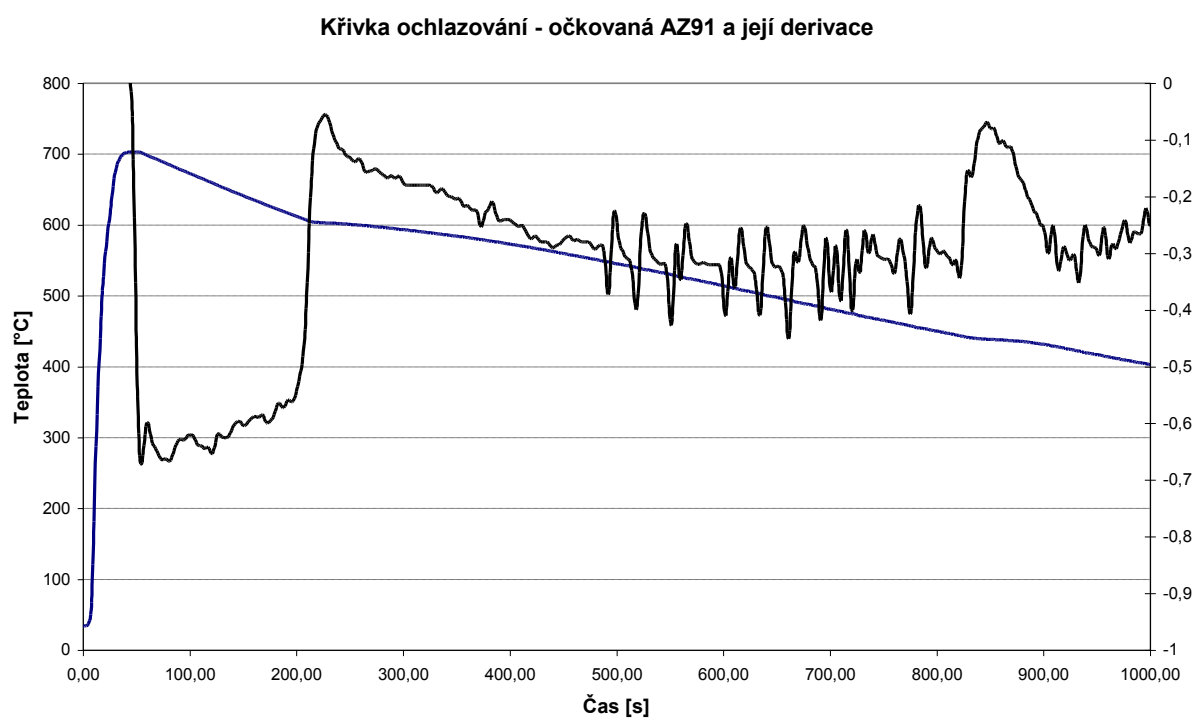
Obr. 19 Křivka ochlazování - očkovaný čistý Mg a její derivace



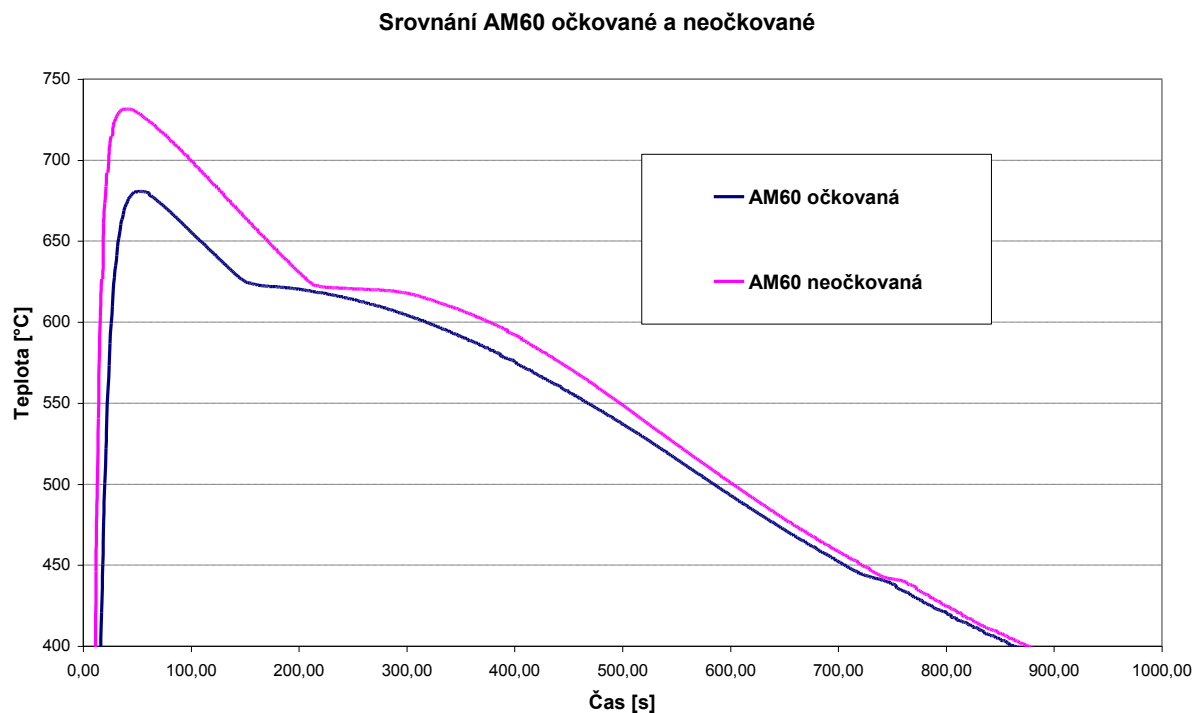
Obr. 20 Srovnání AZ91 očkované a neočkované



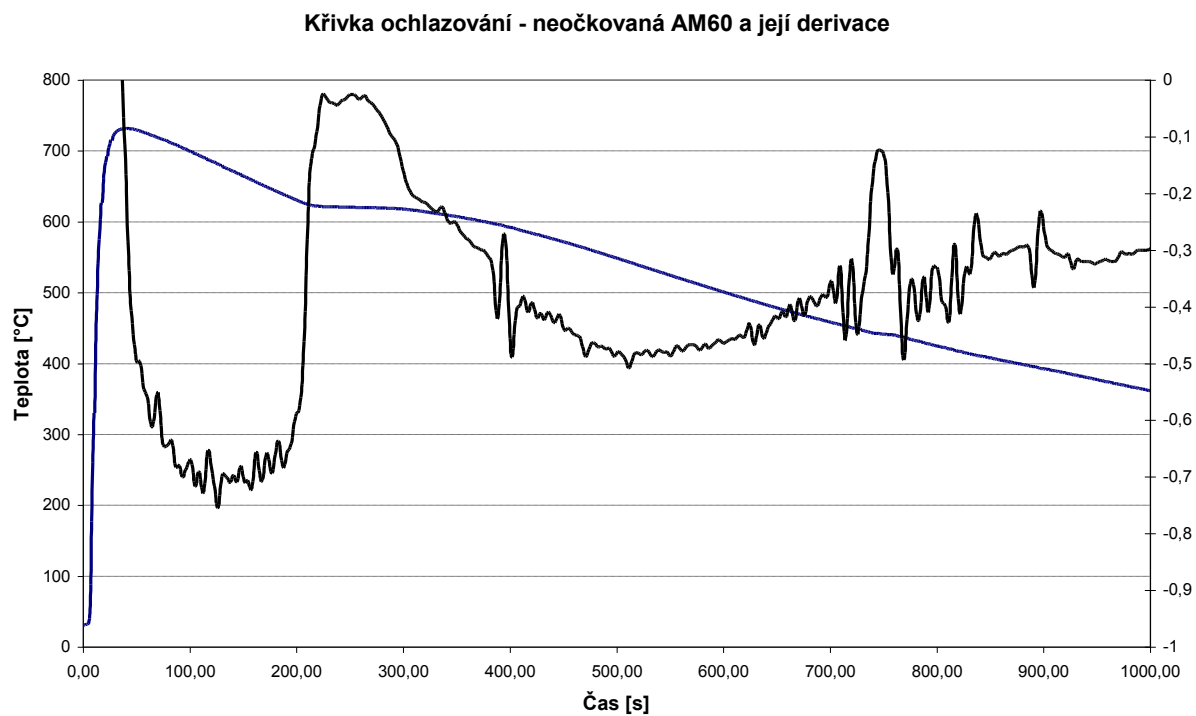
Obr. 21 Křivka ochlazování - neočkovaná AZ91 a její derivace



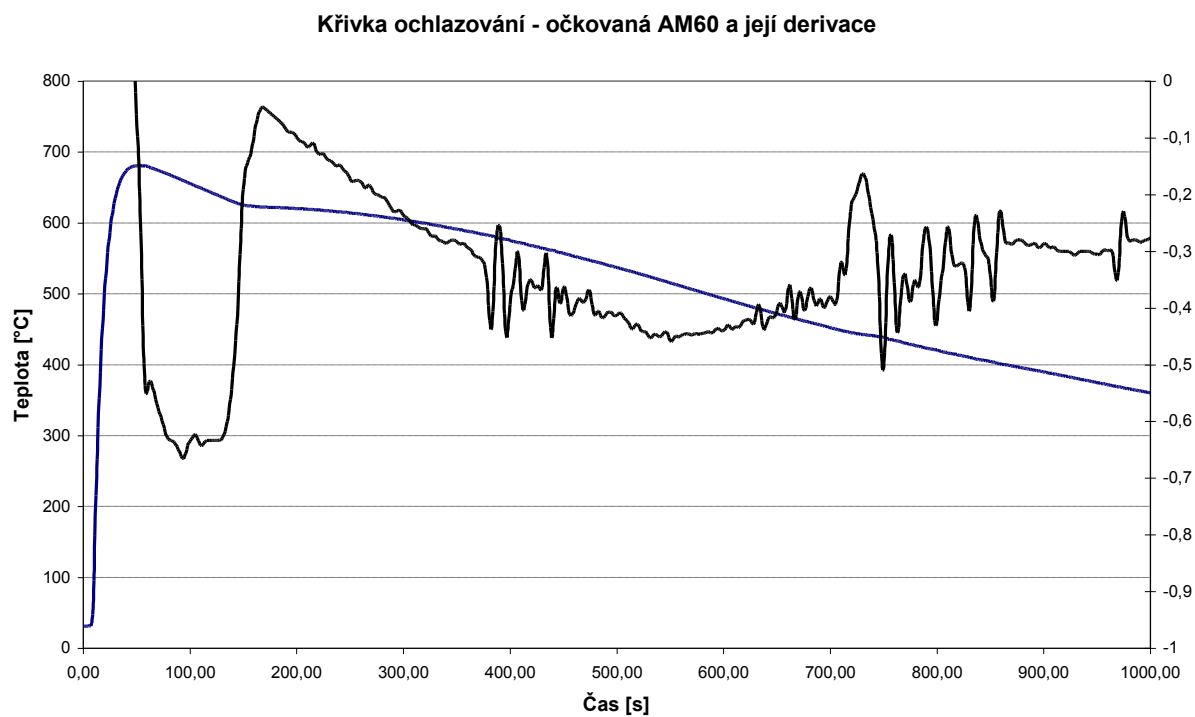
Obr. 22 Křivka ochlazování - očkovaná AZ91 a její derivace



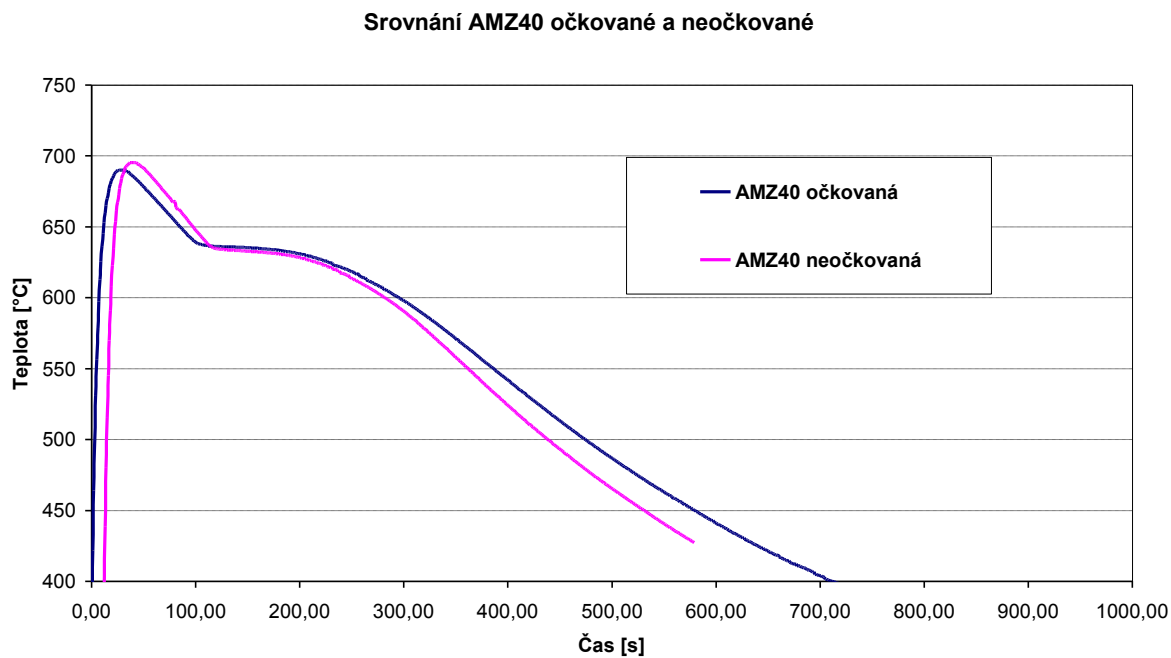
Obr. 23 Srovnání AM60 očkované a neočkované



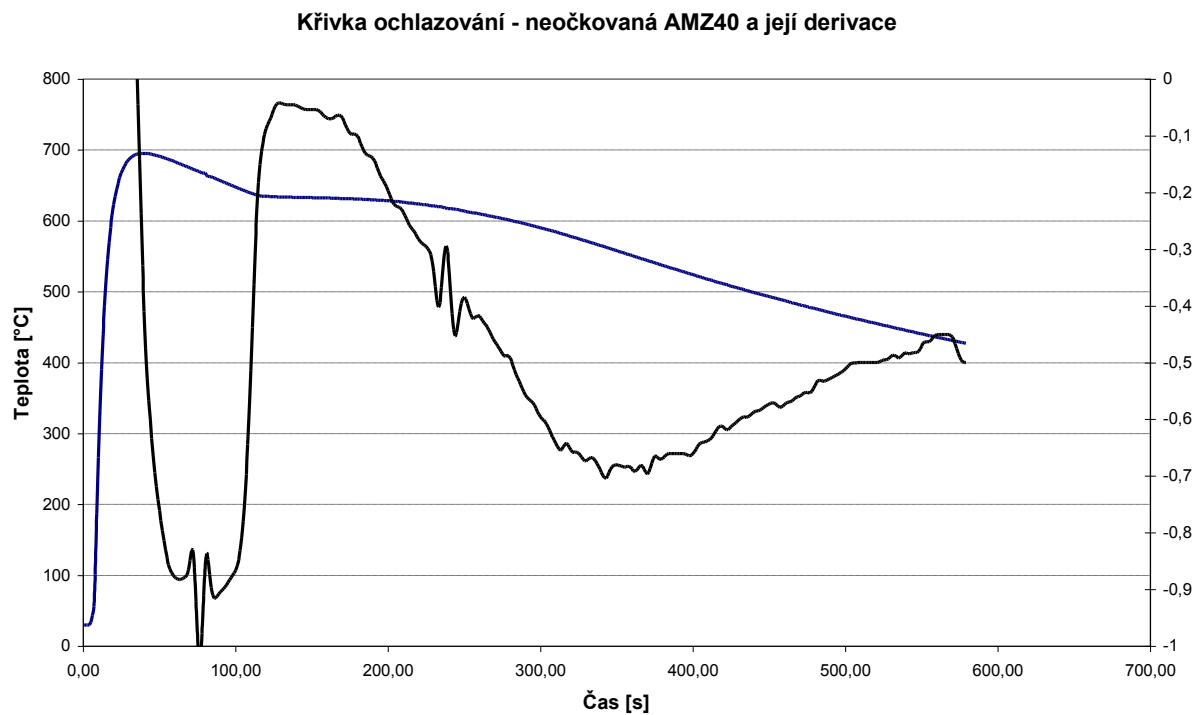
Obr. 24 Křivka ochlazování - neočkovaná AM60 a její derivace



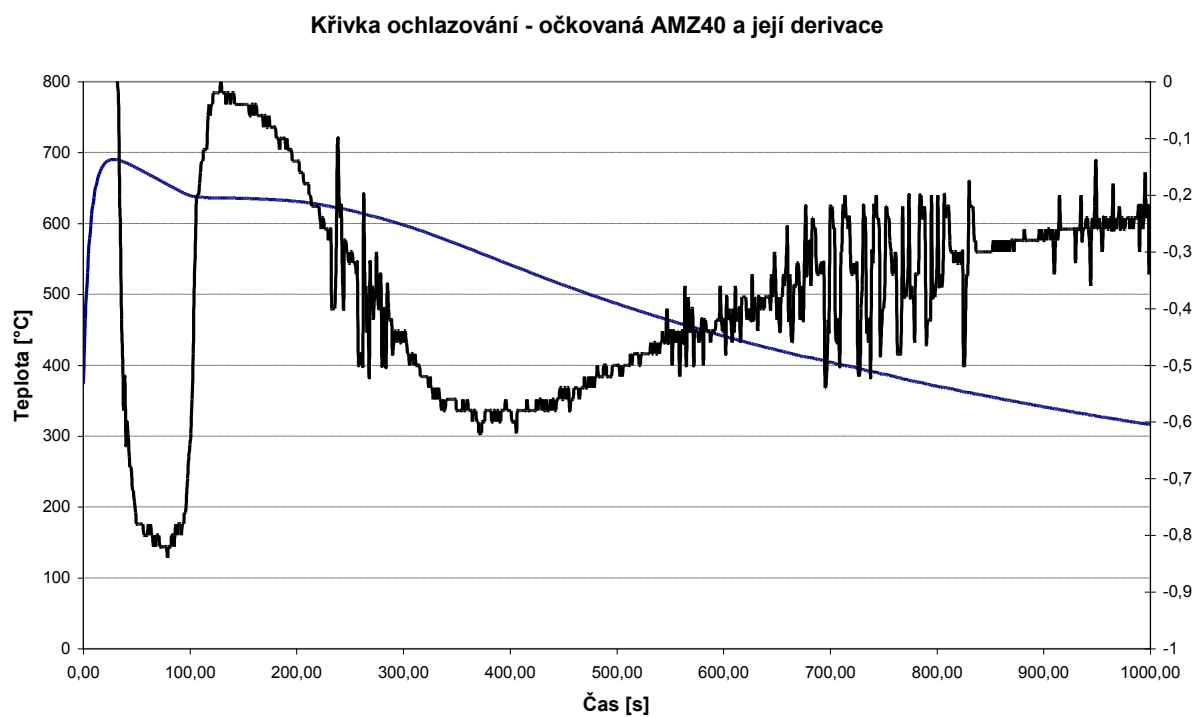
Obr. 25 Křivka ochlazování - očkovaná AM60 a její derivace



Obr. 26 Srovnání AMZ40 očkované a neočkované

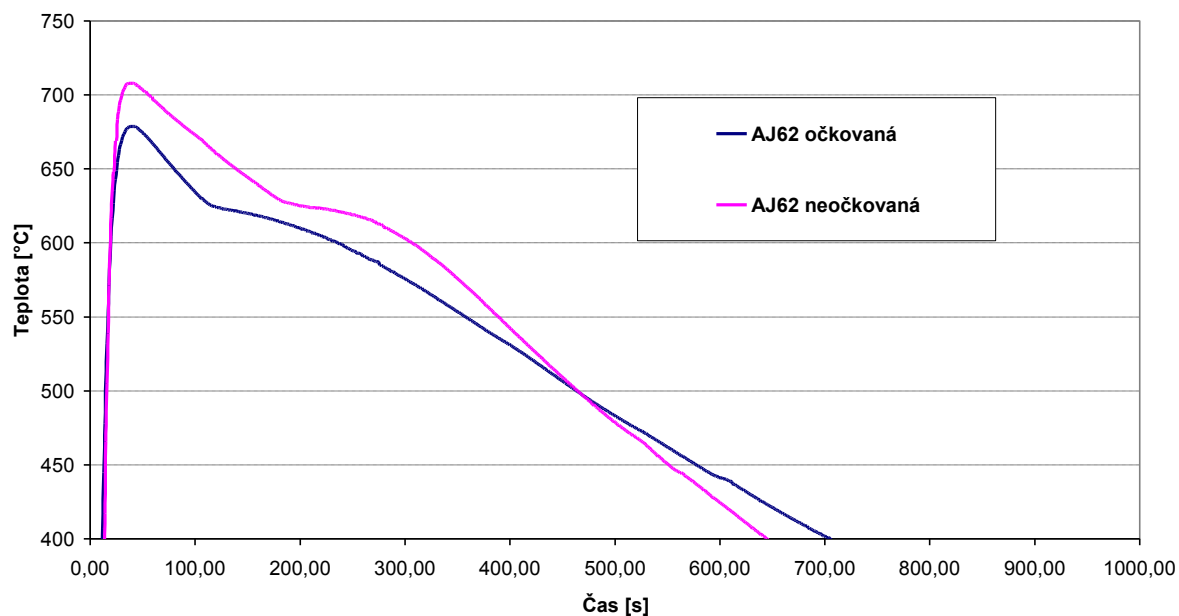


Obr. 27 Křivka ochlazování - neočkovaná AMZ40 a její derivace



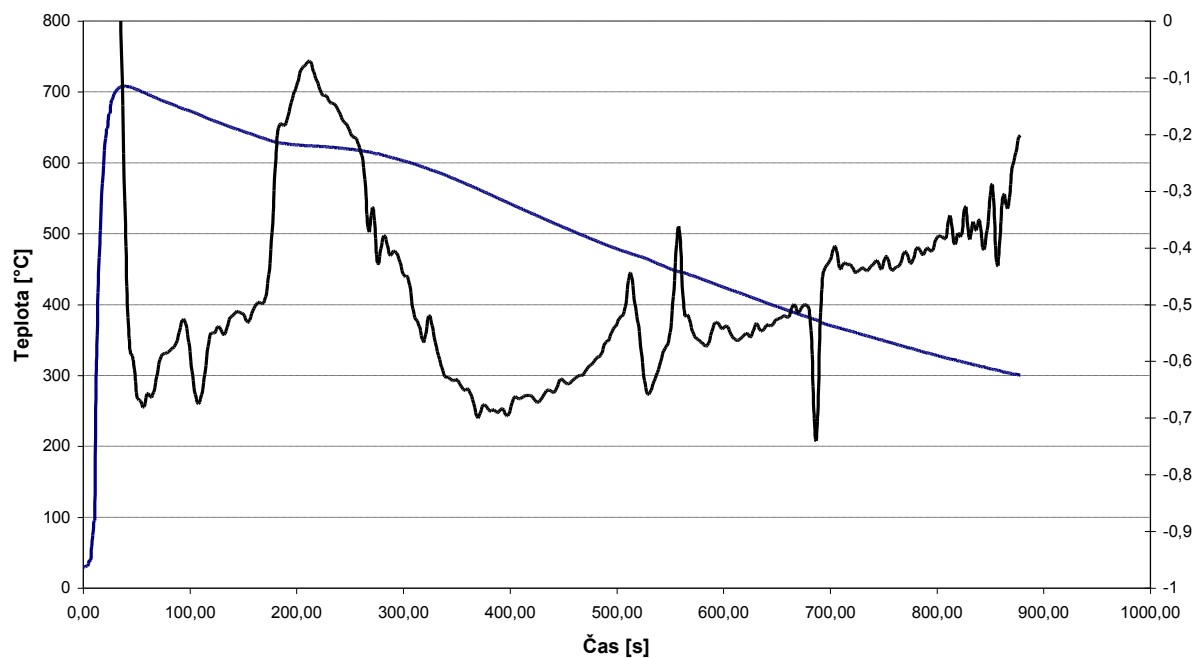
Obr. 28 Křivka ochlazování - očkovaná AMZ40 a její derivace

Srovnání AJ62 očkované a neočkované

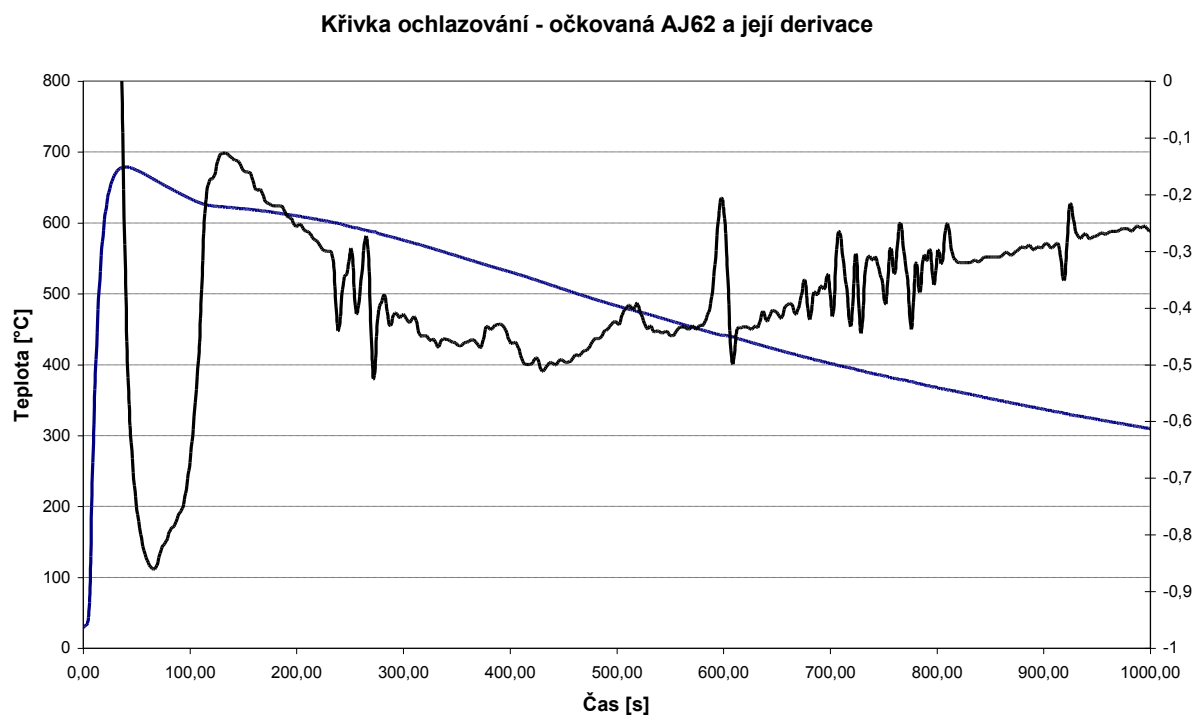


Obr. 29 Srovnání AJ62 očkované a neočkované

Křivka ochlazování - neočkovaná AJ62 a její derivace



Obr. 30 Křivka ochlazování - neočkovaná AJ62 a její derivace



Obr. 31 Křivka ochlazování - očkovaná AJ62 a její derivace

4.2.4 Vyhodnocení výsledků termické analýzy

Získané křivky ochlazování byly porovnávány dle teoretických hodnot z binárních diagramů (Mg-Al, Mg-Zn, Mg-Mn, Mg-Sr) a dle literatury [31]. Prvky Al, Zn, Mn a Sr se objevují u slitin ve větší míře, proto mohou ovlivňovat teplotu solidu a likvidu, popř. teplotu eutektického bodu nejvýrazněji. Naměřené teploty mohou být dále ovlivněny chybou kalibrace termočlánku. Chemické složení je uvedeno v tab. 9. Z křivek ochlazování a její derivace se dala určit teplota likvidu, solidu popř. eutektická teplota. Přesnější identifikace transformačních teplot vyžaduje provedení většího počtu měření.

Pro přesnější identifikaci transformačních teplot se provedla DTA. Vzorek se umístil do pracovního prostoru zařízení SETARAM, kde byl proveden ohřev a ochlazování rychlostí 5 °C/min. Křivky jsou uvedeny v přílohách 1 - 5.

Z naměřených teplot, z literatury [4] a z DTA jsou souhrnné výsledky pro čistý Mg uvedeny v tab. 10. Grafický záznam z termické analýzy a její derivace je na obr. 17-19 a DTA je v příloze 1.

Tab. 10 Výsledky z křivek ochlazování u čistého Mg

Čistý Mg	
	$T_{\text{TÁNÍ}}$
Dle [4]	650 °C
DTA	647 °C
Naměřeno neočkovaný	647 °C
Naměřeno očkovaný	645 °C

Z naměřených teplot, z literatury [31] a z DTA jsou souhrnné výsledky pro slitinu AZ91 uvedeny v tab. 11. Grafický záznam z termické analýzy a její derivace je na obr. 20-22 a DTA je v příloze 2.

Tab. 11 Výsledky z křivek ochlazování u slitiny AZ91

AZ91		
	T_L	T_S
Mg-Al	600 °C	470 °C
Mg-Zn	650 °C	630 °C
Dle [31]	595 °C	470 °C
DTA ohřev	595 °C	426,7 °C
DTA ochlazování	593,1	428,9
Naměřeno neočkována	604 °C	439 °C
Naměřeno očkovaná	603 °C	439 °C

Pro slitinu AM60 jsou souhrnné výsledky z naměřených teplot, z literatury [31] a z DTA uvedeny v tab. 12. Grafický záznam z termické analýzy a její derivace je na obr. 23 až 25 a DTA je v příloze 3.

Pro slitinu AMZ40 jsou souhrnné výsledky z naměřených teplot, z literatury a z DTA uvedeny v tab. 13. Grafický záznam z termické analýzy a její derivace je na obr. 26-28 a DTA je v příloze 4.

Z naměřených teplot, z literatury a z DTA jsou souhrnné výsledky pro slitinu AJ62 uvedeny v tab. 14. Grafický záznam z termické analýzy a její derivace je na obr. 29-31 a DTA je v příloze 5.

Tab. 12 Výsledky z křivek ochlazování u slitiny AM60

AM60		
	T _L	T _S
Mg-Al	620 °C	530 °C
Mg-Mn	650 °C	440 °C
Dle [31]	615 °C	540 °C
DTA ohřev	616,4 °C	434,5 °C
DTA ochlazování	613,6 °C	427,1 °C
Naměřeno neočkovaná	620 °C	443 °C
Naměřeno očkovaná	623 °C	443 °C

Tab. 13 Výsledky z křivek ochlazování u slitiny AMZ40

AMZ40		
	T _L	T _S
Mg-Al	620 °C	550 °C
Mg-Mn	650 °C	450 °C
Mg-Zn	650 °C	630 °C
DTA ohřev	630 °C	574 °C
DTA ochlazování	623 °C	-
Naměřeno neočkovaná	634 °C	570 °C
Naměřeno očkovaná	635 °C	565 °C

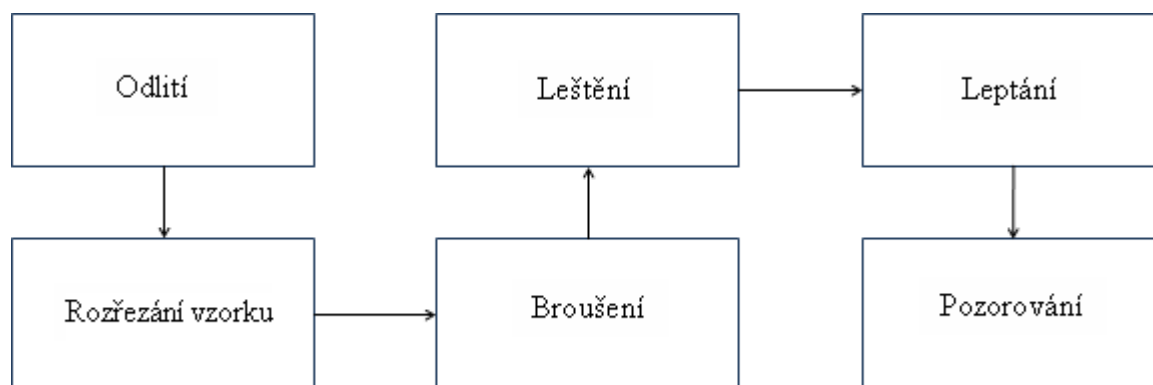
Tab. 14 Výsledky z křivek ochlazování u slitiny AJ62

AJ62		
	T _L	T _S
Mg-Al	610 °C	530 °C
Mg-Sr	635 °C	550 °C
DTA ohřev	611 °C	528 °C
DTA ochlazování	605 °C	517 °C
Naměřeno neočkovaná	624 °C	520 °C
Naměřeno očkovaná	622 °C	518 °C

4.3 Metalografie

4.3.1 Příprava vzorků

Metalografie pojednává o vnitřní stavbě kovů a jejím cílem je zviditelnit strukturu materiálu a následně ji studovat na mikroskopu. Příprava vzorků pro pozorování probíhá v několika krocích viděno na obr. 32.



Obr. 32 Schéma přípravy vzorků pro metalografii

Vzorek pro metalografický výbrus byl v prvním kroku rozřezán na pásové pile a označen razídkem (obr. 33), aby nedošlo k případné záměně.



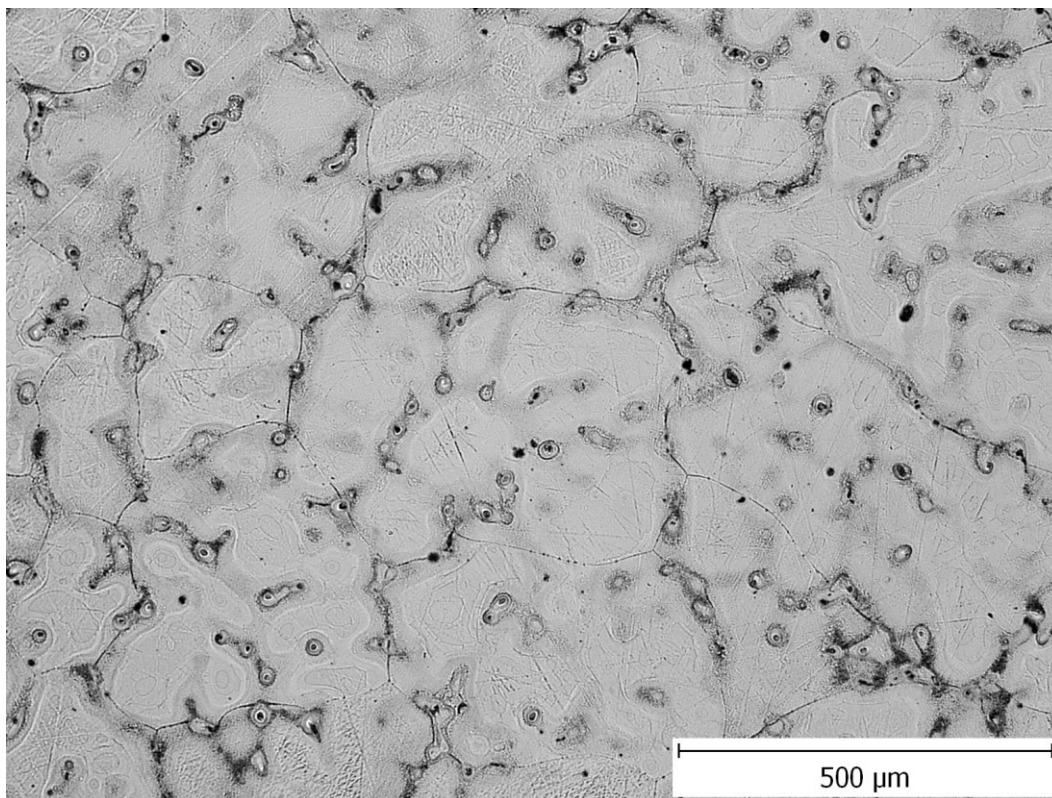
Obr. 33 Rozřezané vzorky z 1. série taveb

Pozorovaná plocha se musí nejdříve povrchově upravit a to broušením, aby se dosáhlo rovinného povrchu a na mikroskopu se rozeznaly jednotlivé složky struktury. Vzorky byly broušeny na metalografické brusce chlazené vodou a bylo použito brusných papírů o drsnosti

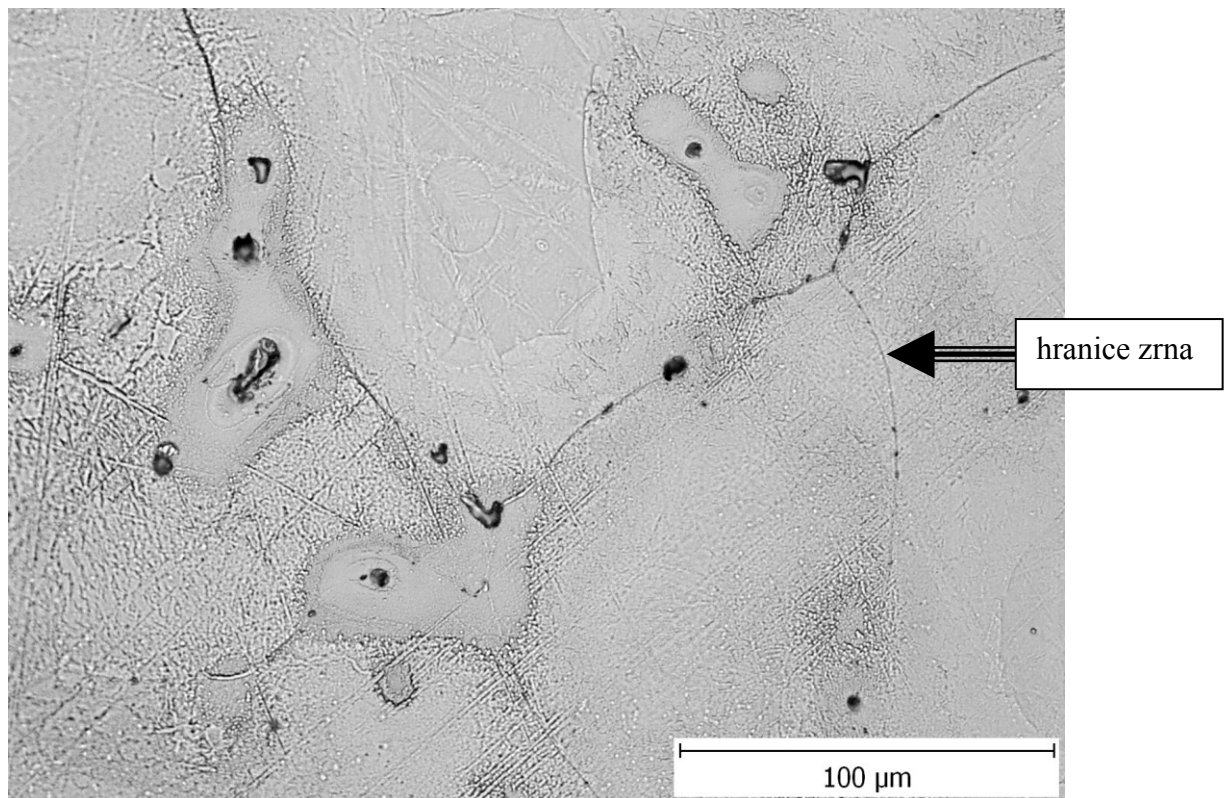
60, 120, 320, 600, 800, 1200 a 1500. Po posledním broušení musela být plocha vzorků očištěna lihem a důkladně vysušena. Leštění probíhalo na leštícím sukně o drsnosti 2000 za přítomnosti 1 % emulze Al_2O_3 . Při leštění se už neodebírá materiál, tak jako u broušení, jen se dostává konečného tvaru plochy vzorku. Poté se každý vzorek musí očistit od případných nečistot vatou pod proudem vody, opět ošetřit lihem a být vysušen. Další a poslední krok bylo leptání což je proces, při kterém dochází ke zviditelnění jednotlivých strukturních součástí, jelikož po broušení a leštění je struktura zakryta tvářenou B-vrstvou. Pokud se chce struktura studovat, musí být tato vrstva odstraněna. Leptání probíhá tak, že se vzorek ponoří do leptacího činidla, v našem případě do roztoku 2 % HNO_3 a poté se zase osuší.

4.3.2 Získané metalografické struktury

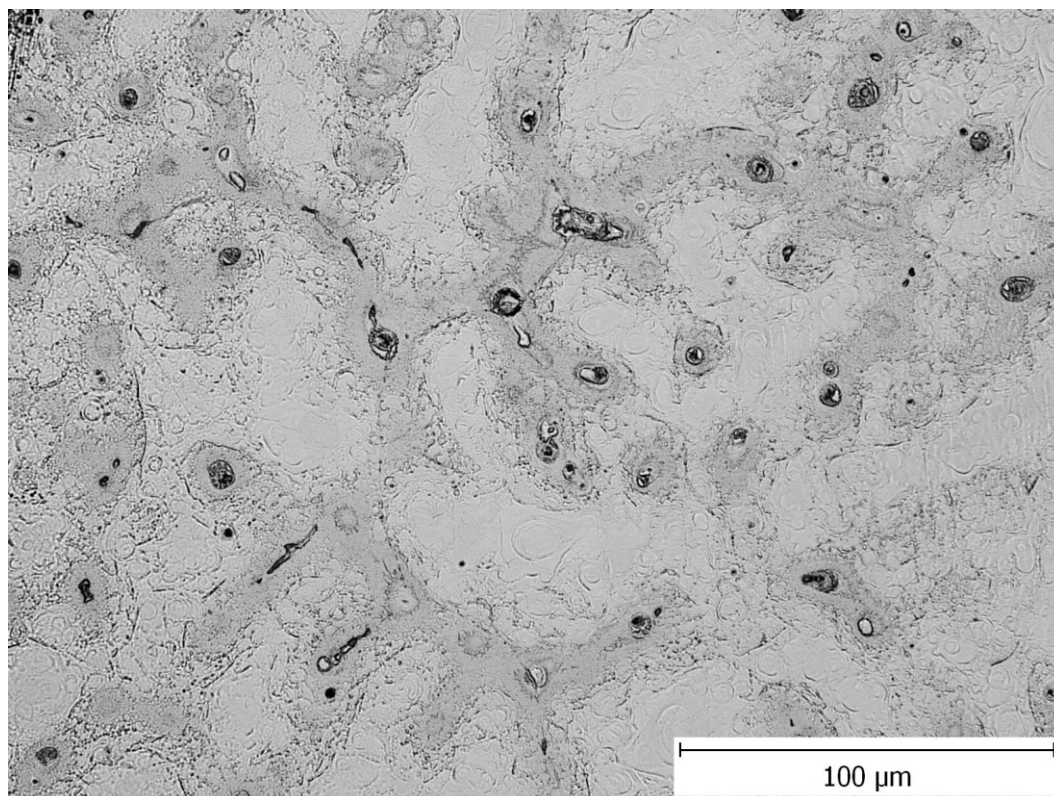
Struktura vzorků byla pozorována vždy ve střední části. Snahou bylo zjistit, zda se očkování projevilo i na struktuře vzorků, a to tak, že zrna by měla být menší a ve větším počtu. Struktury jsou viděny v následujících obrázcích 34 - 52.



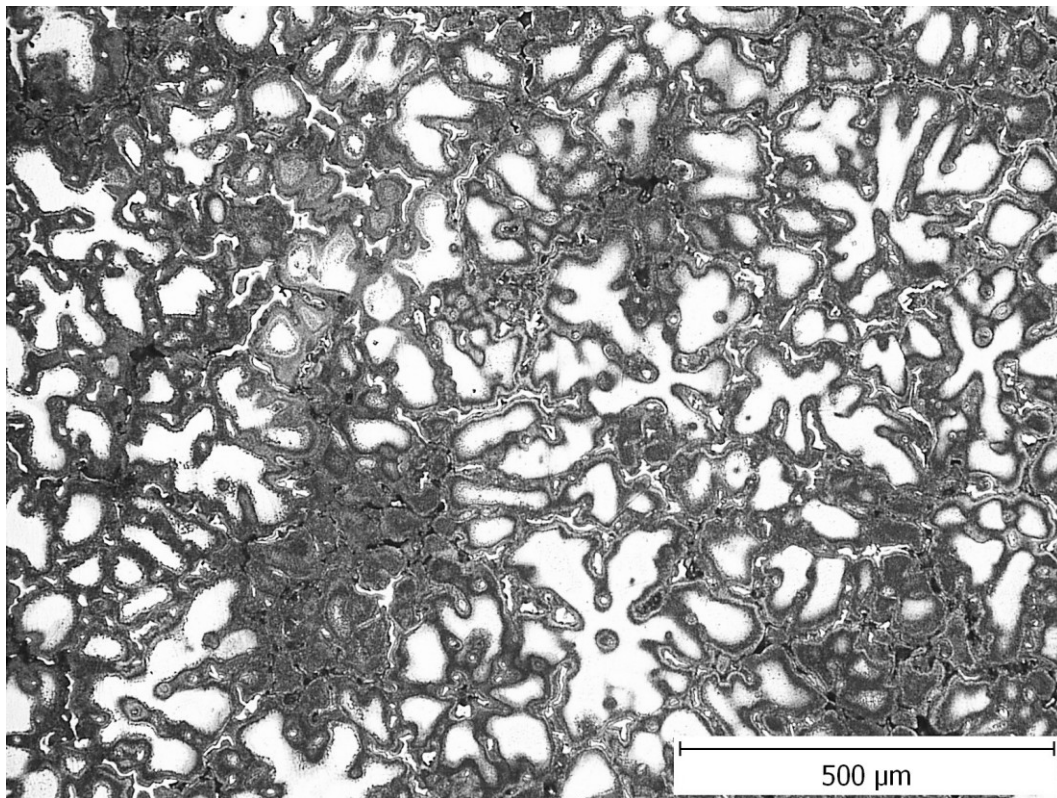
Obr. 34 Čistý Mg, neočkováno, 100x



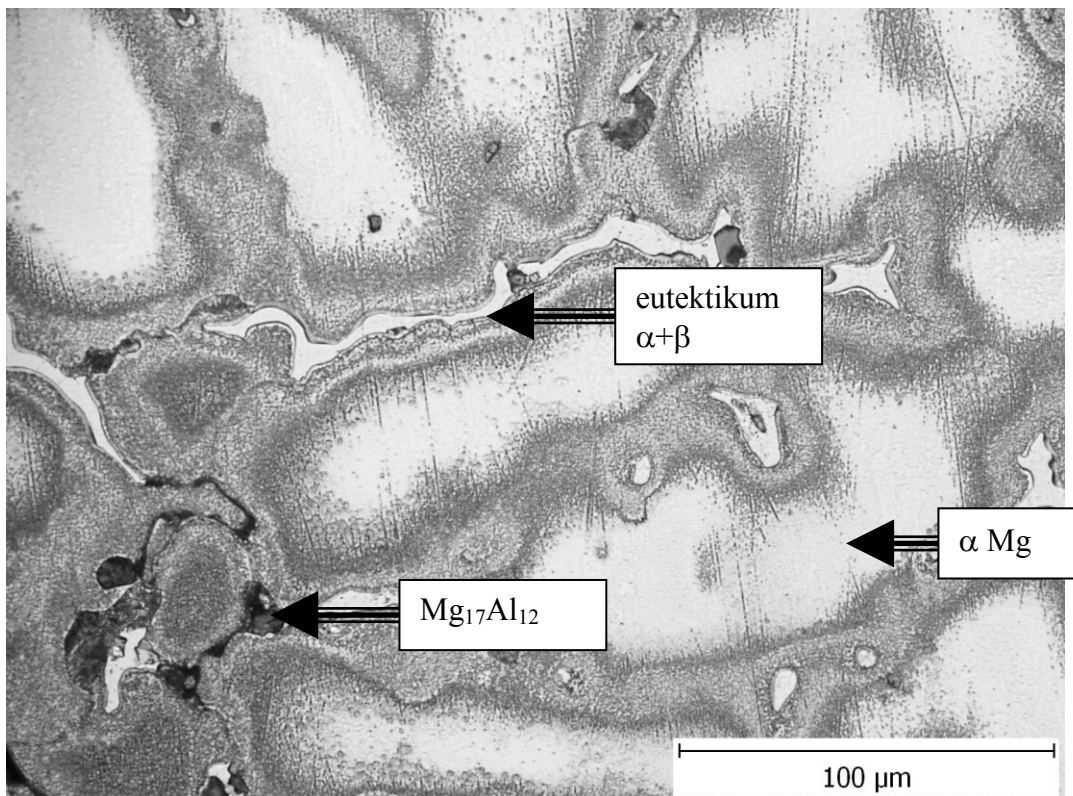
Obr. 35 Čistý Mg, neočkováno, 500x



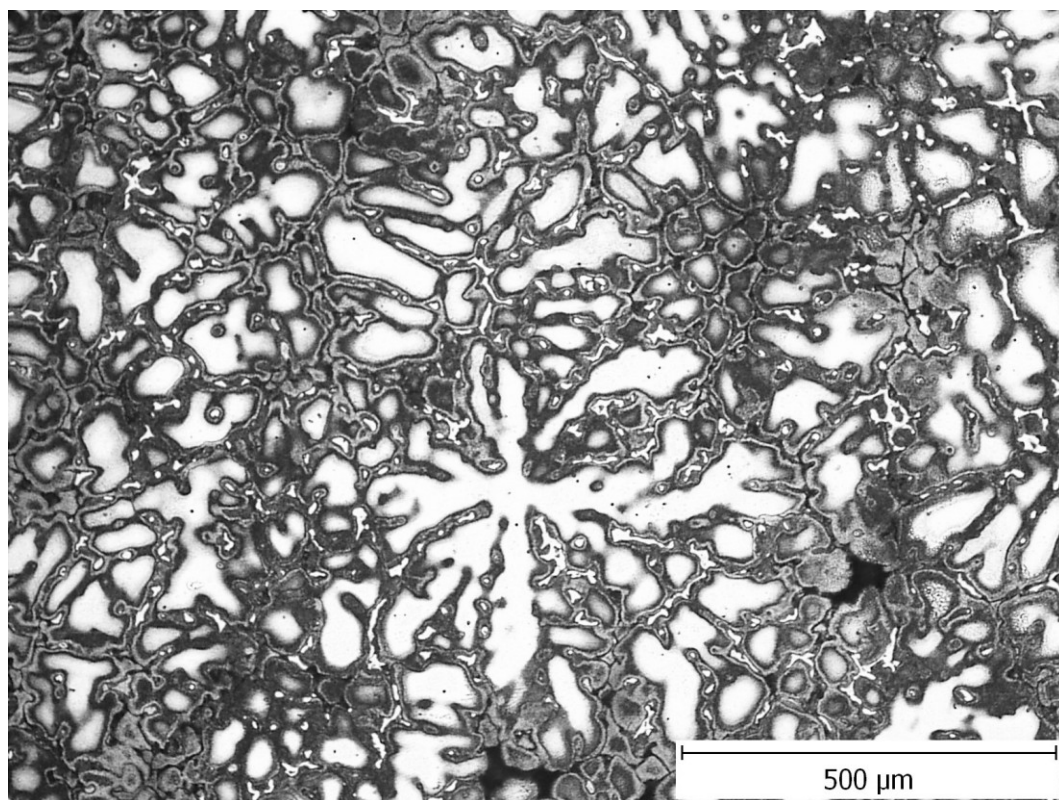
Obr. 36 Čistý Mg, očkováno, 500x



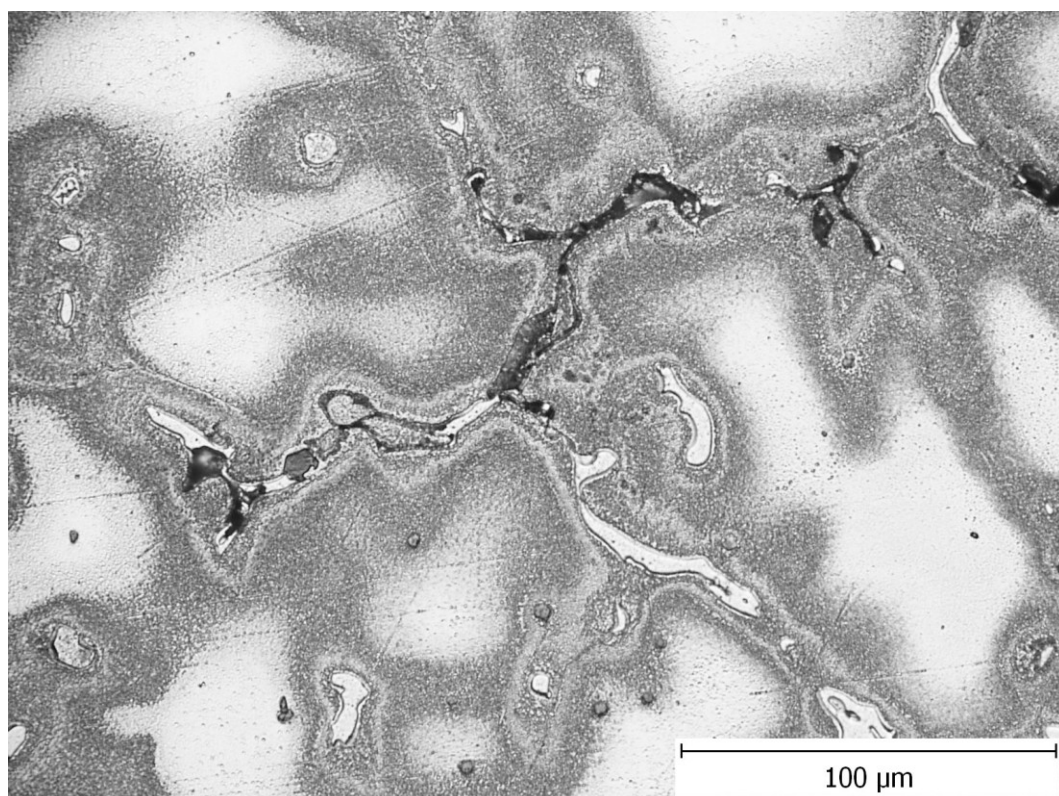
Obr. 37 AZ91 neočkováno, 100x



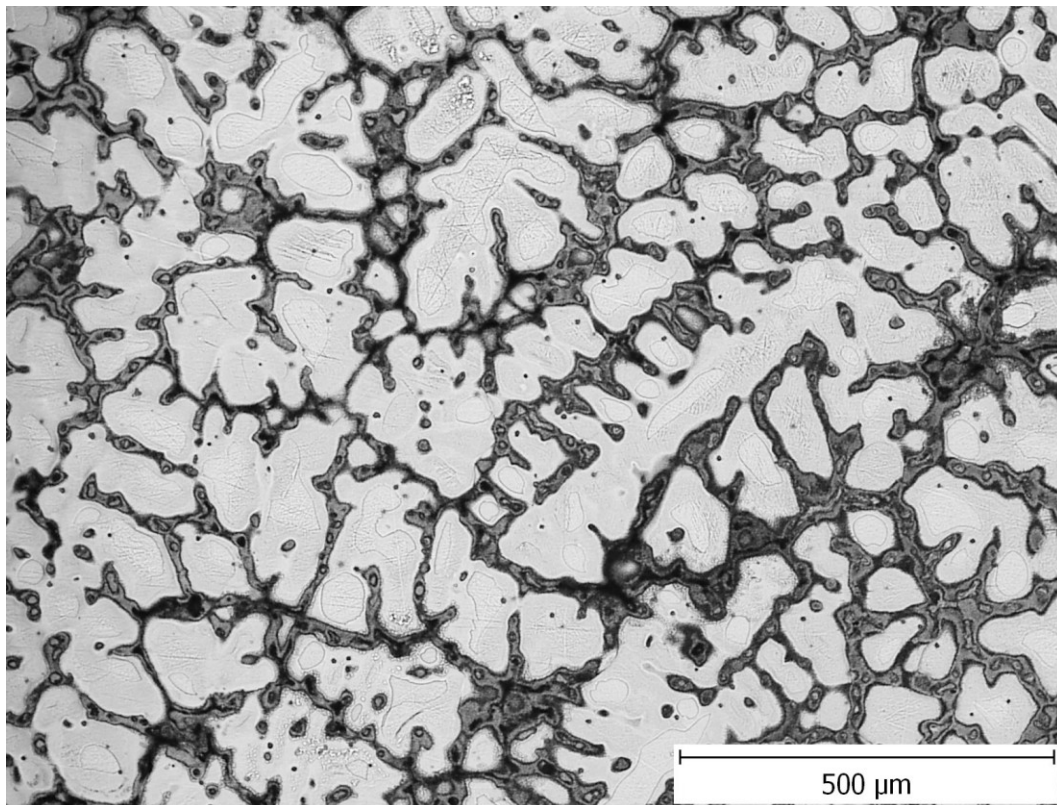
Obr. 38 AZ91 neočkováno, 500x



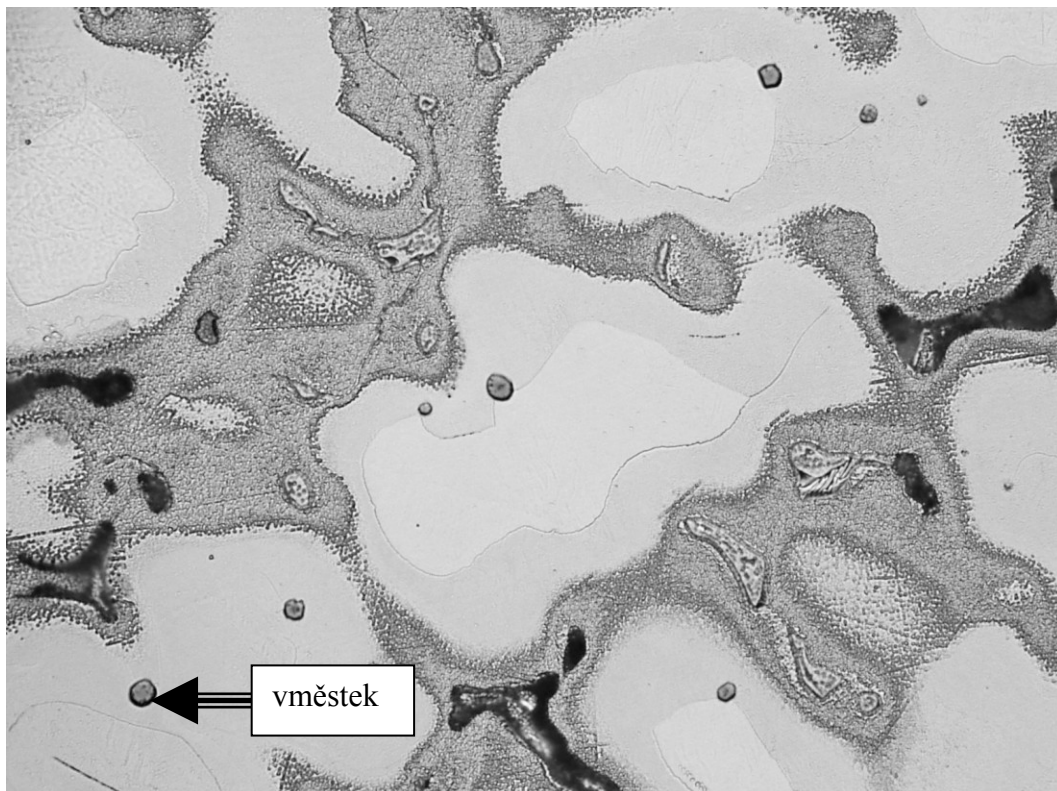
Obr. 39 AZ91 očkováno, 100x



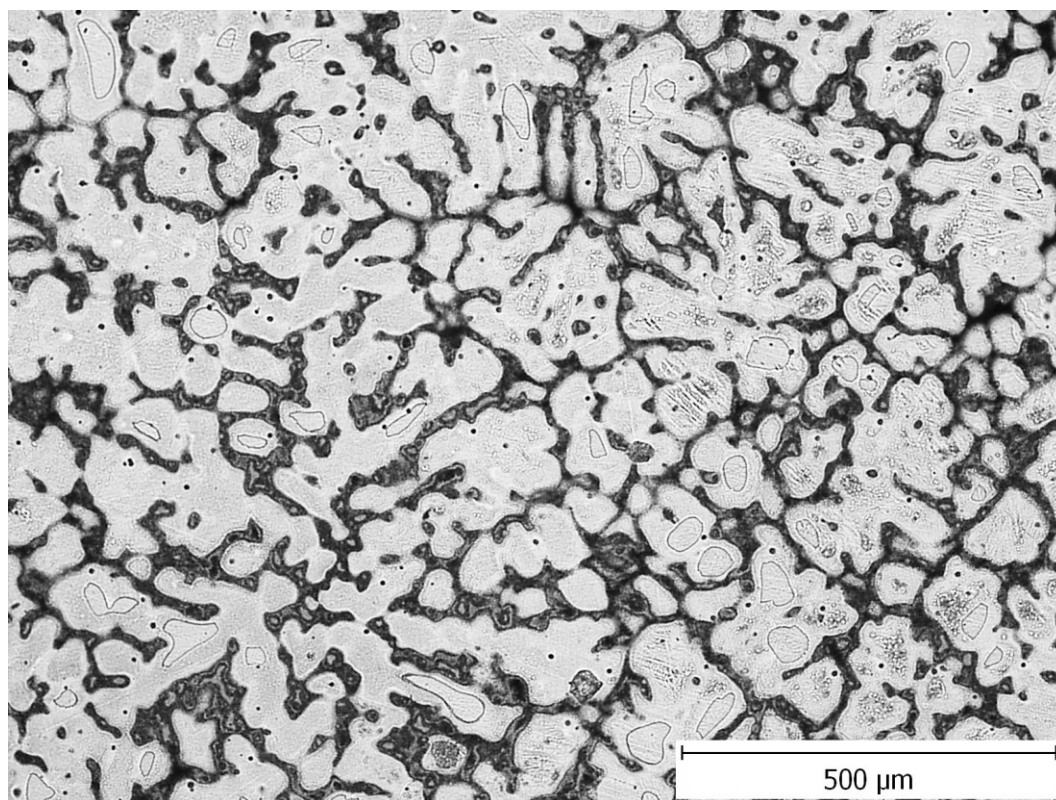
Obr. 40 AZ91 očkováno, 500x



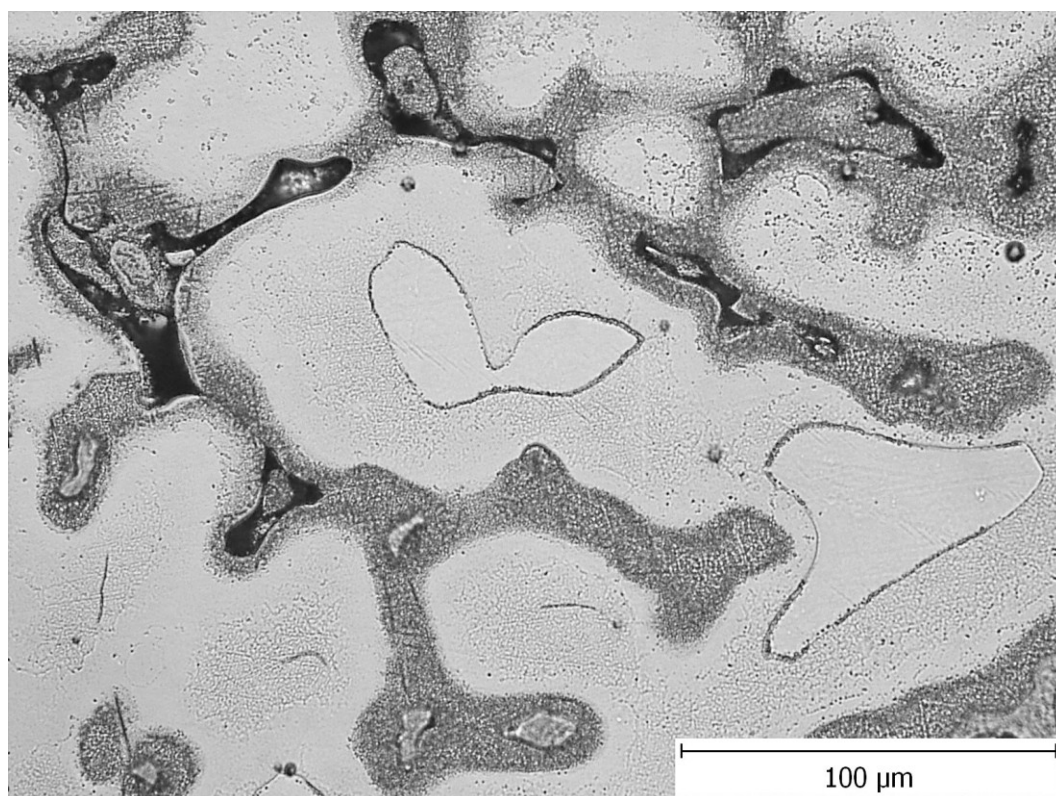
Obr. 41 AM60 neočkováno, 100x



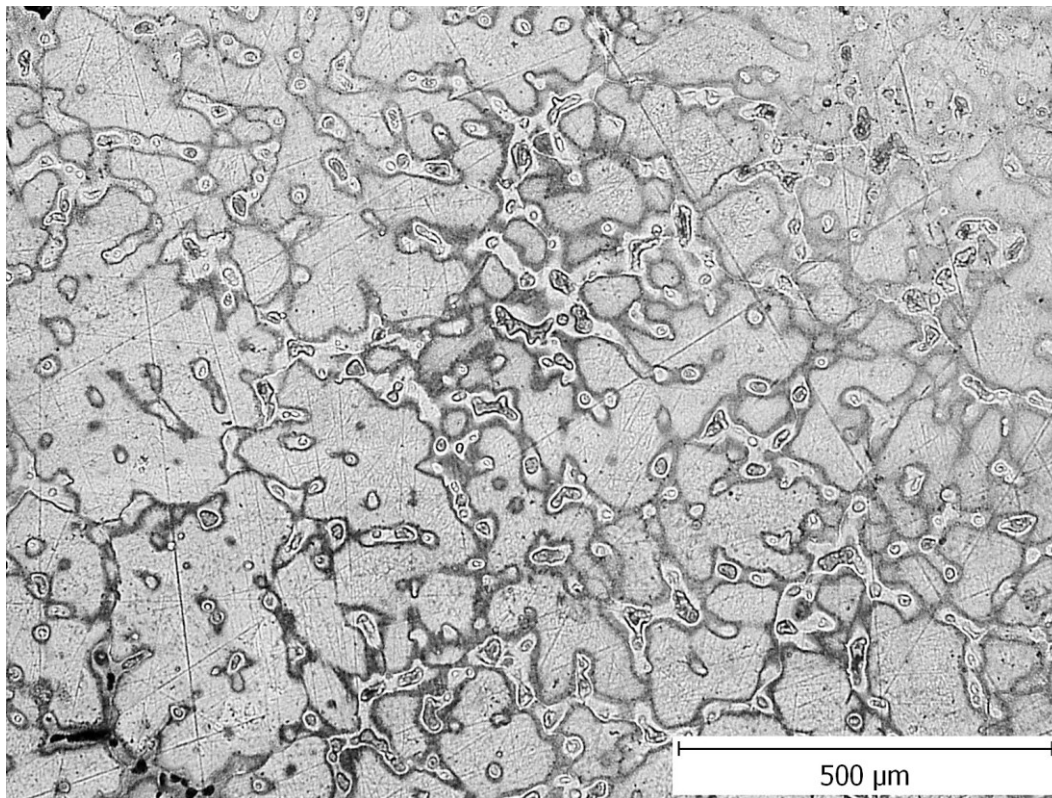
Obr. 42 AM60 neočkováno, 100x



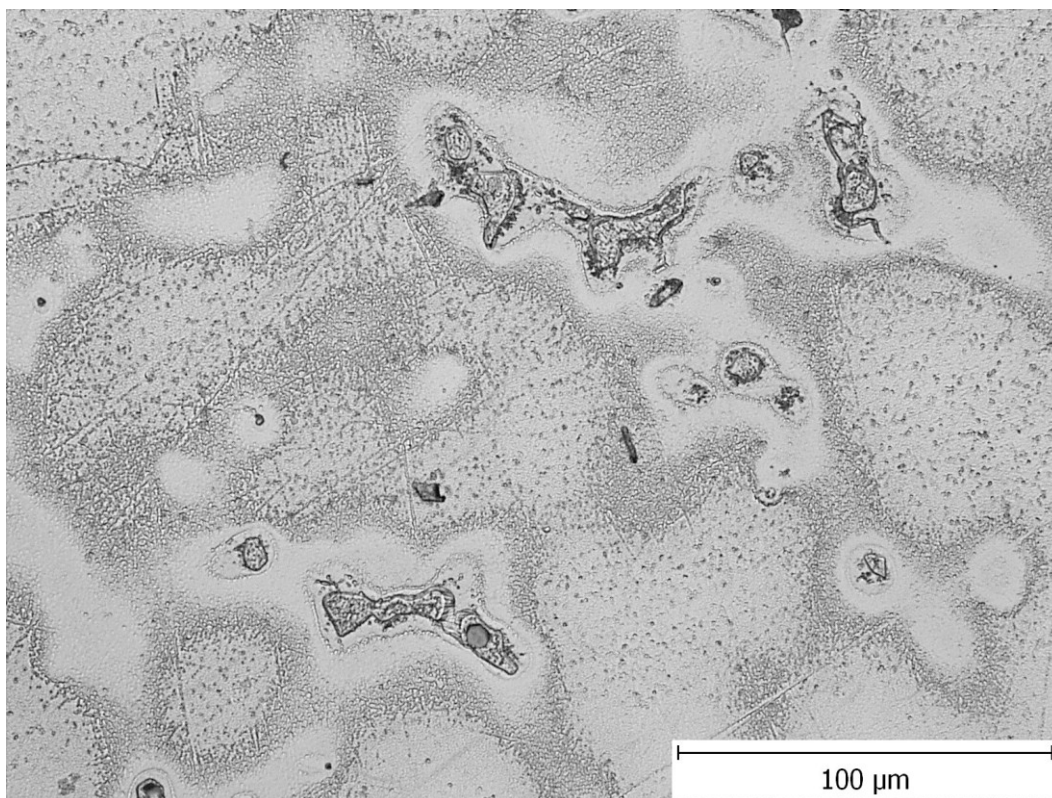
Obr. 43 AM60 očkováno, 100x



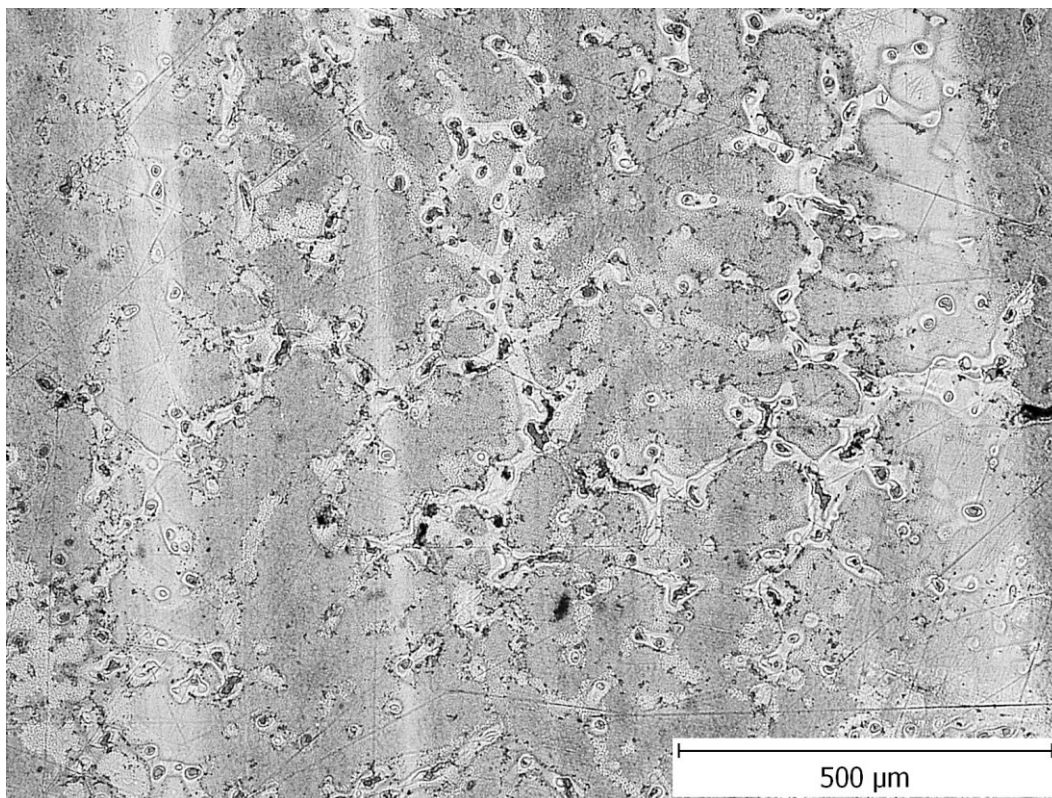
Obr. 44 AM60 očkováno, 500x



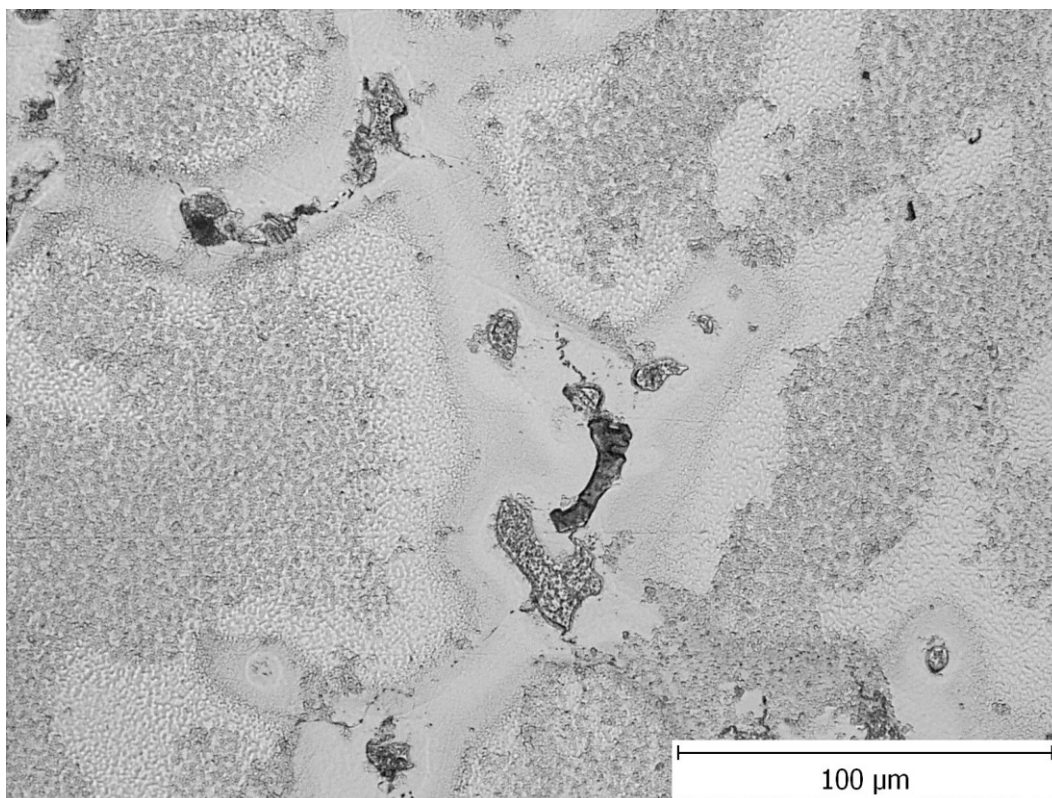
Obr. 45 AMZ40 neočkováno, 100x



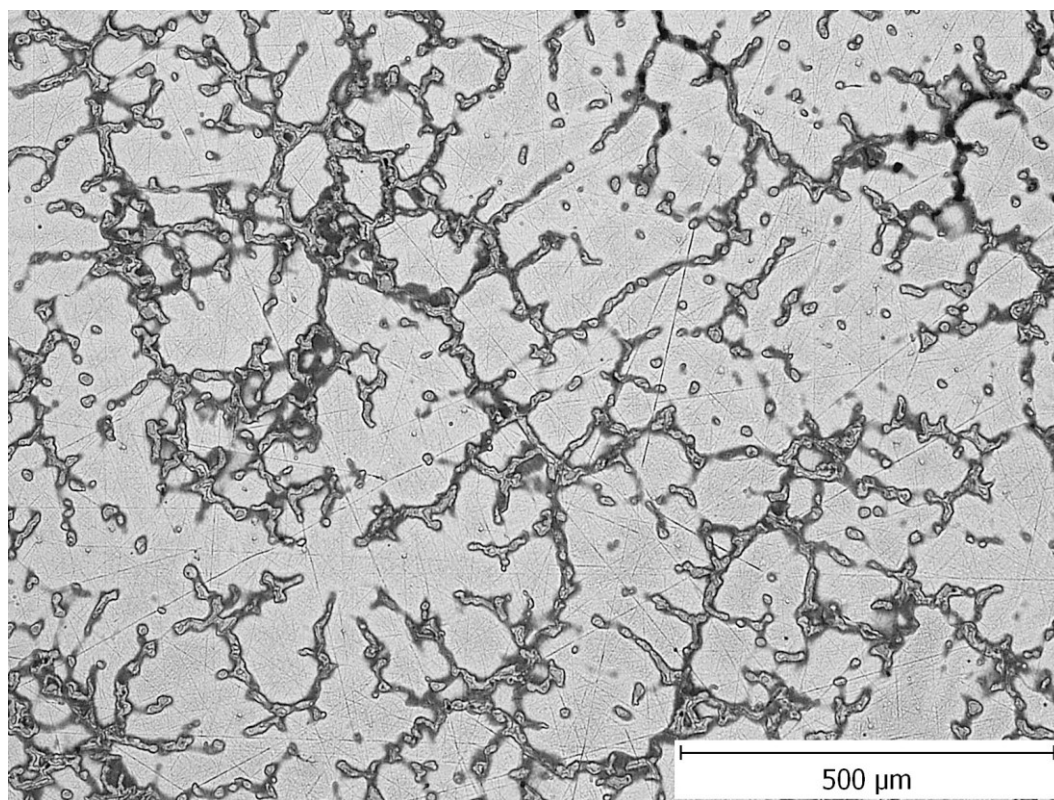
Obr. 46 AMZ40 neočkováno, 500x



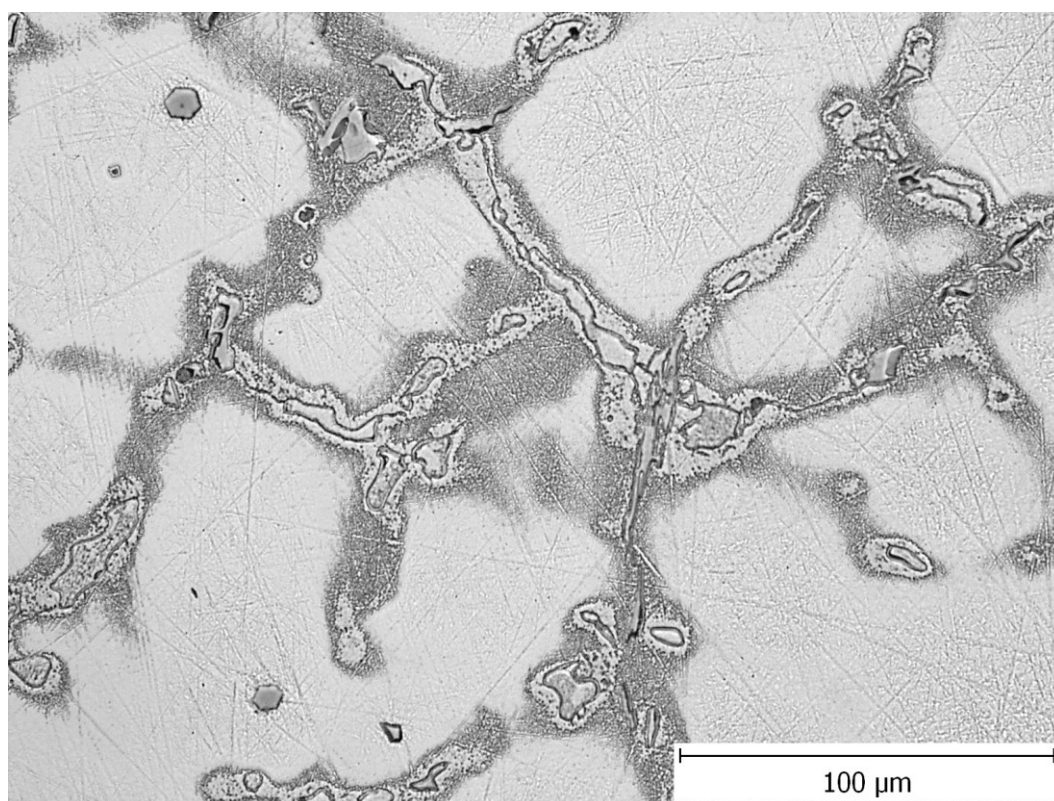
Obr. 47 AMZ40 očkováno, 100x



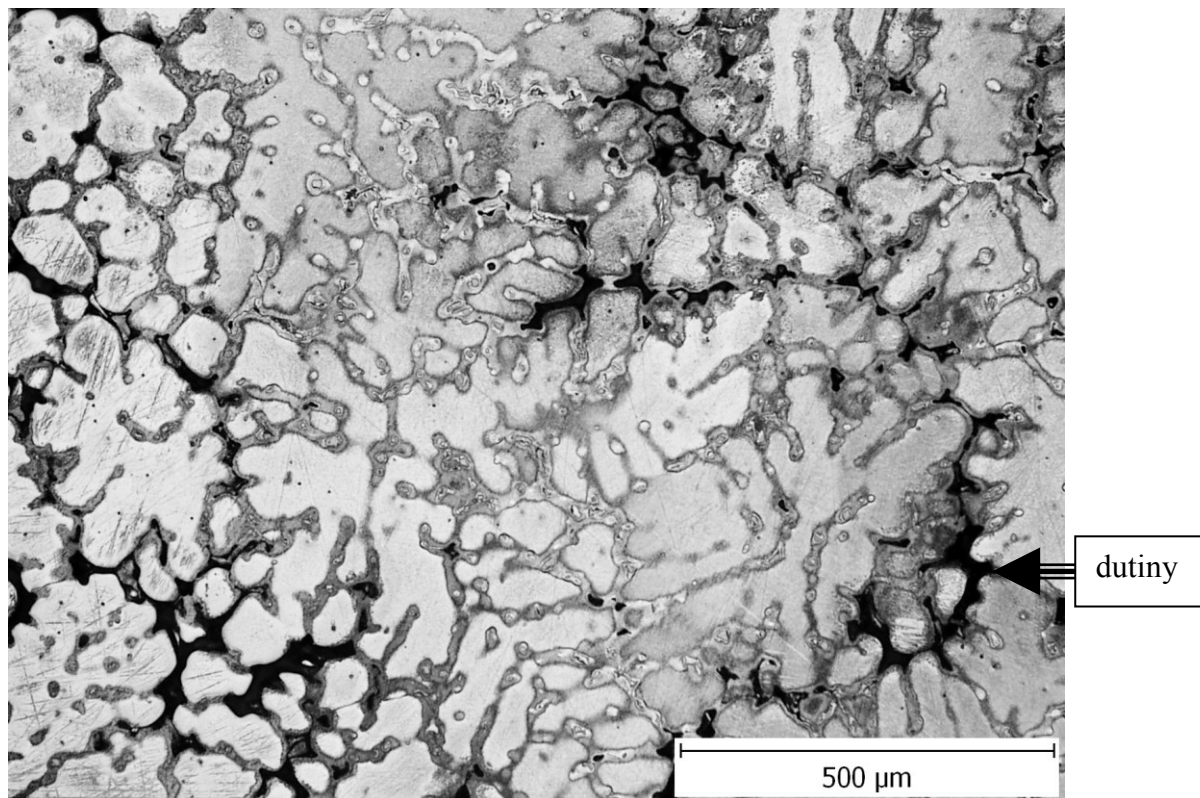
Obr. 48 AMZ40 očkováno, 500x



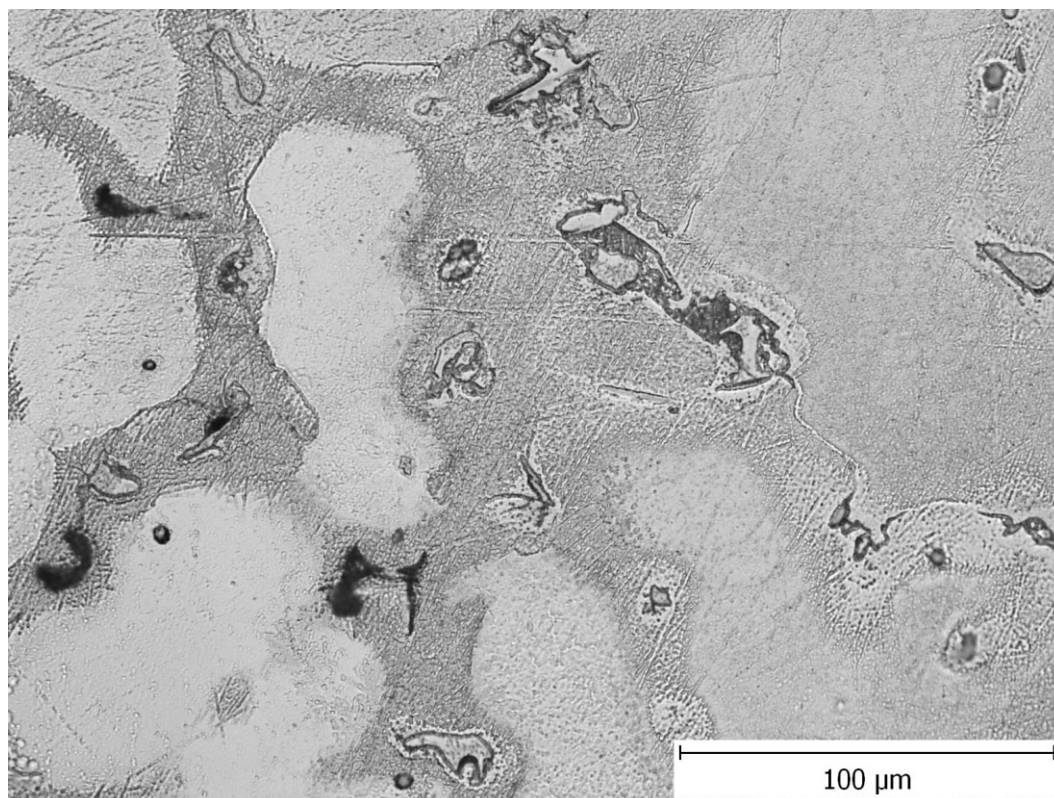
Obr. 49 AJ62 neočkováno, 100x



Obr. 50 AJ62 neočkováno, 500x



Obr. 51 AJ62 očkováno, 100x



Obr. 52 AJ62 očkováno, 500x

4.3.3 Zhodnocení struktur

Obecně lze mikrostrukturu litých vzorků charakterizovat jako nepravidelně rozložený souhrn fází, které budou následně popsány.

U všech zkoumaných slitin lze usuzovat, že se ve vzorcích vždy vyskytuje fáze α Mg s eutektikem, tvořené hlavními přísadovými prvky Al, Zn, Mn, Sr. Další vyloučenou fází mohou být precipitáty např. $Mg_{17}Al_{12}$, $Mg_{17}Zn_{12}$ nebo $Mg_{17}Sr_2$.

Kromě těchto fází se mohou na strukturách objevit i dutiny, tvořené zejména krycí a rafinační soli, které mohou být způsobeny odleptáním nečistot, a nebo se může jednat o mikrostaženiny v mezidendritickém prostoru (obr. 51).

- **Čistý Mg**

U čistého Mg se jako u jediného struktura získala oxidicko-chemickým leptáním, leštěním na podložce Opechem a smáčedlem OPS od firmy Struers. Na obr. 34-36 lze pozorovat viditelné hranice zrn. Na obr. 36 u očkovaného Mg lze také pozorovat více zrn o menších rozměrech než u neočkovaného Mg.

- **AZ91**

Struktura AZ91 je vidět na obr. 37-40. Na obr. 38 při pětisetnásobném zvětšení je detailně popsána struktura, ze které se mohou následně hodnotit další struktury slitin. Lze pozorovat viditelný tuhý roztok Mg a eutektikum $\alpha+\beta$. Na hranicích zrn je vyloučená intermetalická fáze $Mg_{17}Al_{12}$.

- **AM60**

Struktura u slitiny AM60 má v porovnání se slitinou AZ91 více vyloučeného tuhého roztoku Mg (obr. 41-44). Na obr. 43 při stonásobném zvětšení lze pozorovat vliv očkovaní.

- **AMZ40**

Struktura této slitiny je na obr. 45-48. Vykazuje oproti jiným slitinám atypickou strukturu. Měla by být dalším důvodem ke zkoumání, např. barevnou metalografií.

- **AJ62**

Na obr. 49-52 lze vidět strukturu slitiny AJ62. Na obr. 51 při stonásobném zvětšení je očkovaná slitina a lze vidět větší množství dutin, které mohou být zapříčiněny vlivem rafinační soli, jelikož na obr. 49 kde je neočkovaná slitina se dutiny neobjevují.

5. ZÁVĚR

V této práci jsme se zabývali vlivem očkovaní na křivky ochlazování čistého Mg a slitin AZ91, AM60, AMZ40, AJ62 a zároveň studiem mikrostruktury slitin hořčíku v očkované a neočkované podobě.

Na křivkách ochlazování byly zaznamenány teploty likvidu, solidu, které byly konfrontovány s teoretickými hodnotami. Na těchto křivkách byly provedeny derivace, které zvýraznily významné body na křivkách ochlazování. Při řešení diplomové práce bylo ke stanovení také použito diferenciální termické analýzy, která přispěla k identifikaci jednotlivých transformačních teplot.

Vliv očkovaní byl v souladu s teoretickými předpoklady, prokázalo se zjemnění zrna, ale pro detailnější závěry by bylo nutné provést v první řadě další tavby, ze kterých by se získalo více vzorků. Dále by bylo nutné provést mikrostrukturní analýzu na elektronovém mikroskopu a detailněji prozkoumat sledované oblasti vzorků.

Výsledky měření mohou být využity při dalším studiu vlastností hořčíkových slitin, např. měření termomechanických vlastností slitin, které by mohli sloužit pro konstruktéry k návrhu materiálů vhodných slitin pro použití litých součástí, nebo polotovarů určených pro další zpracování např. tvářením.

6. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] *Hydro.com* [online]. May 30, 2001 [cit. 2011-04-29]. Hydro Magnesium full speed ahead in China. Dostupné z WWW: <<http://www.hydro.com/en/Press-room/News/Historic-news-archive/2001/May/Hydro-Magnesium-full-speed-ahead-in-China/>>.
- [2] *Intlmag.org* [online]. [cit. 2011-04-29]. Industry statistics. Dostupné z WWW: <<http://www.intlmag.org/statistics.html>>.
- [3] GREWOOD, N. N. ; EARNSHAW, A.: *Chemie prvků*. Praha 1993, s. 245-263, ISBN 80-85427-38-9.
- [4] MORDIKE, B.L.; EBERT, T.: Magnesium, properties – application – potential. *Materials Science A 302*. 2001, s. 37-45.
- [5] ČECH, J.; JUŘIČKA, I.; BOUCNÍK, P.: Použití hořčíkových slitin ve slévárenství. 5. Medzinárodná vedecká konferencia CO-MAT-TECH, Trnava, 14.10. - 15.10.1997. Dostupné na World Wide Web: <http://www.explat.cz/files/pouziti_mg_slitin_ve_slevarenstvi.pdf>
- [6] *Minerals.usgs.gov* [online]. 02-Mar-2011 [cit. 2011-04-29]. Magnesium Statistics and Information. Dostupné z WWW: <<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/magnesium/>>.
- [7] ŽÁČEK, D. *Mechanické vlastnosti hořčíkových slitin*. Ostrava, 2010. 54 s. Diplomová práce. VŠB-TUO.
- [8] ROUČKA, J.: *Metalurgie neželezných slitin*. VUT Brno 2004, 143s, ISBN 80-214-2790-6.
- [9] *Palba.cz* [online]. [cit. 2011-04-29]. Německé slitiny hořčíku. Dostupné z WWW: <http://www.palba.cz/portal.php?topic_id=3488>.
- [10] KUCHAR, L.; DRÁPALA, J.; KRYBUS, K. Binární systémy hořčík-příměsy. Metal 2011. 18.-20.5.2003. Dostupný také z WWW: <<http://www.metal2011.com/data/metal2004/sbornik/papers/7.pdf>>.
- [11] PTÁČEK, L.: *Slévárenské slitiny hořčíku*. Slévárenství LII, č. 2-3, s. 61-66.
- [12] ČERMÁK, J.; HAWELKA, M.; TATÍČEK, F. Současné trendy ve zpracování hořčíkových slitin tvářením. *MM Průmyslové spektrum*. 2005, 10, s. 59. Dostupný také z WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/soucasne-trendy-ve-zpracovani-horcikovych-slitin-tvarenim>>.
- [13] DRÁPALA, J.; KUCHAR, L.; TOMÁŠEK, K.; TROJANOVÁ, Z.: *Magnesium, its alloys and Mg – admixture binary system*. VŠB –TU Ostrava, 2004, 172 s. ISBN 80-248-0579-0

- [14] MASSALSKI, T.D.: *Binary Alloy Phase Diagrams*. ASM Metals Park, Ohio, 1987.
- [15] Pišek, F. : *Nauka o materiálu I/3*. Praha: Akademia, 1973.
- [16] MASSALSKI, T.D.: *Binary Alloy Phase Diagrams*. Second Edition Plus Updates on CD ROM, ASM International, Metals Park, Ohio, 1996.
- [17] PTÁČEK, L.; ZEMČÍK, L.: *Metallurgy properties and structure of Mg-Li alloys*. Metallography 95, Stará Lesná 1995, 523s.
- [18] *Magnextrusco.net* [online]. [cit. 2011-04-29]. Dostupné z WWW: <<http://magnextrusco.rtdproject.net/>>.
- [19] JUŘIČKA, I.; MAISNAR, J.: *Specifické podmínky tavení a lití hořčíkových slitin*. Slévárnictví LII, č. 2-3, s. 66-70.
- [20]] HERMAN, A.; STUNOVÁ, B.: *Výhody použití Mg slitin v porovnání s ostatními konstrukčními materiály*. MM Průmyslové spektrum. 2005, 11, s. 78. Dostupný také z WWW:<<http://www.mmspektrum.com/clanek/vyhody-pouziti-mg-slitin-v-porovnani-s-ostatnimi-konstrukcnimi-materialy-2>>.
- [21] ČECH, J; PACAL, B.; SVOBODA, R.: *Tlakově lité odlitky z Mg slitin*. Slévárnictví LVII, č.11-12, s. 401-405.
- [22] Kurtz-metals.com [online]. [cit. 2011-04-29]. Dostupné z WWW: <<http://www.kurtz-metals.com/>>.
- [23] HERMAN, A.; STUNOVÁ, B.: *Výhody použití Mg slitin v porovnání s ostatními konstrukčními materiály*. MM Průmyslové spektrum. 2005, 10, s. 92. Dostupný také z WWW:<<http://www.mmspektrum.com/clanek/vyhody-pouziti-mg-slitin-v-porovnani-s-ostatnimi-konstrukcnimi-materialy>>.
- [24] MICHNA,S: *Progresivní technologie*. [cit. 2011-04-29]. Dostupné z WWW: <<http://www.stefanmichna.com/download/progresivni-technologie.pdf>>.
- [25] Mag Tech 1: Novel Casting technologies. Report of a DTI (Department of Trade & Industry) global watch mission, September/October 2004, s.10-14. Dostupné z WWW: <http://www.improve.it/metro/file.php?file=/1/Papers/Aluminium_and_Magnesium_Foundry_Alloys/mg.pdf>.
- [26] MATULA, L.: *Zkušenosti z experimentálního tlakového odlévání hořčíku ve slévárně KOVOLIT, a. s., Modřice*. Slévárnictví LVII, č.9-10, s. 358-360.
- [27] *magnesium-elektron.com* [online]. [cit. 2011-04-29]. Dostupné z WWW: <http://www.magnesium-elektron.com/about-magnesium.asp?ID=1>
- [28] MAZUCH, M. *Vybrané vlastnosti slévárenských slitin hořčíku*. Ostrava, 2009. 71 s. Diplomová práce. VŠB-TUO.

- [29] obr.improve.it [online]. [cit. 2011-04-29]. Dostupné z WWW: <http://www.google.cz/search?hl=cs&biw=1280&bih=546&site=search&tbm=isch&sa=1&q=pou%C5%BEit%C3%AD+slitin+Mg&aq=f&aqi=&aql=&oq=>
- [30] *Vscht.cz* [online]. [cit. 2011-04-29]. Termická analýza-teorie. Dostupné z WWW: http://www.vscht.cz/met/stranky/vyuka/labcv/labor/fm_termicka_analyza/teorie.htm.
- [31] *Properties of Cast Magnesium Alloys* [online]. [cit. 2011-04-29]. Dostupné z WWW: http://mg.tripod.com/asm_prop.htm.

PŘÍLOHY

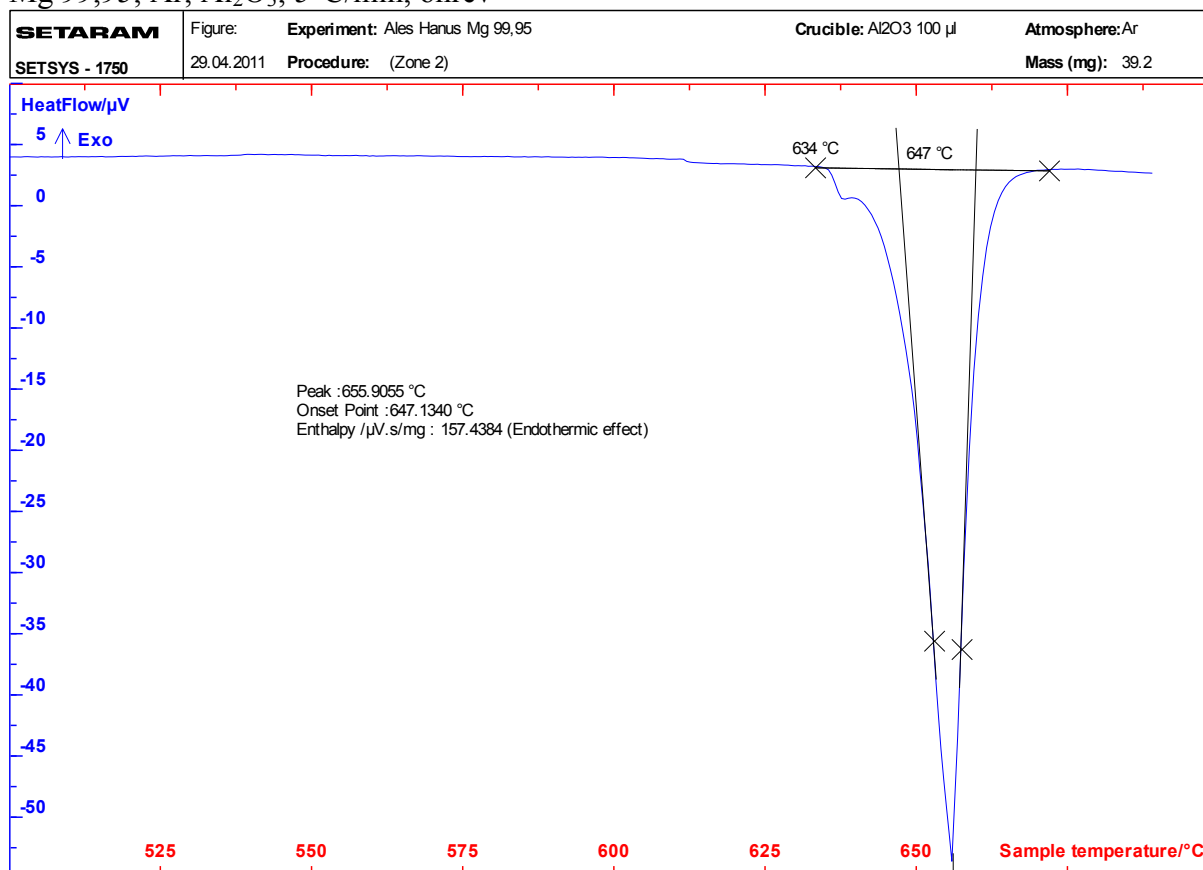
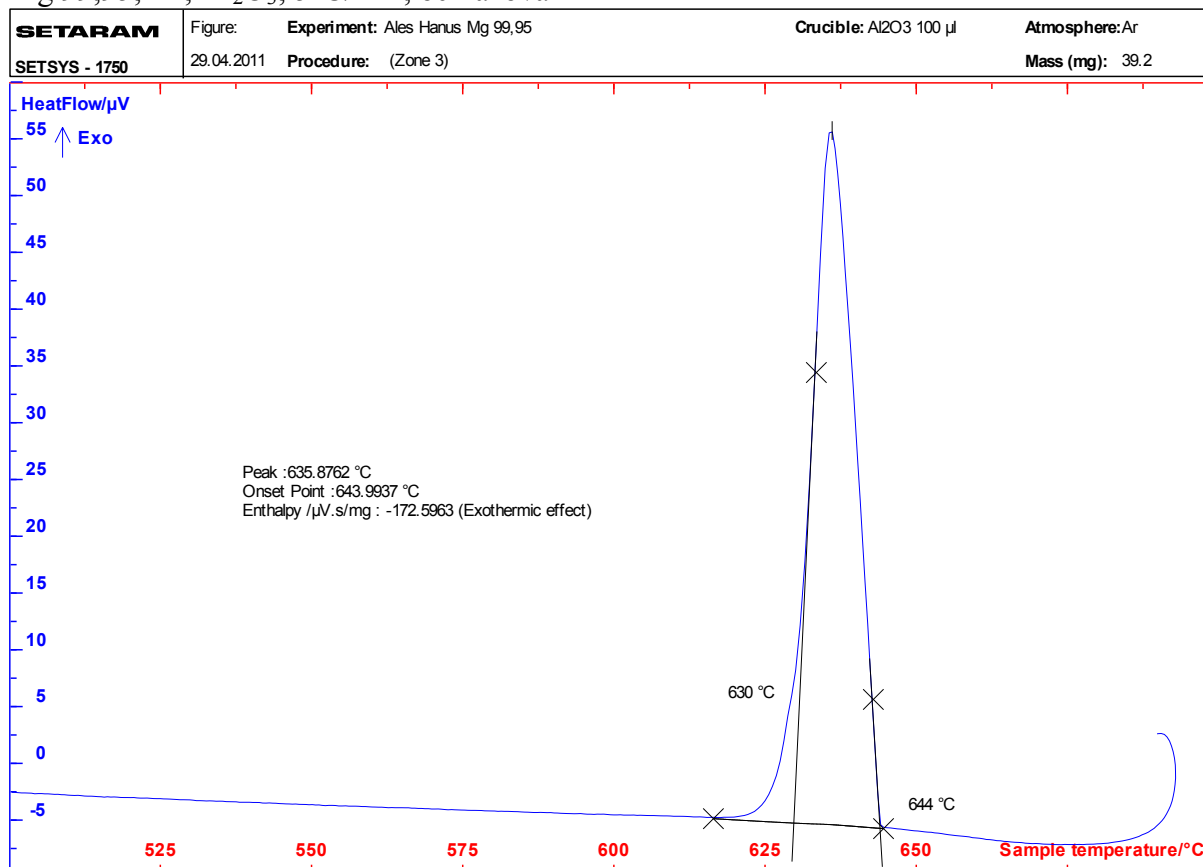
Příloha 1: Mg 99,95 ohřev, ochlazování

Příloha 2: AZ91, ohřev a ochlazování [28]

Příloha 3: AM60 ohřev a ochlazování [28]

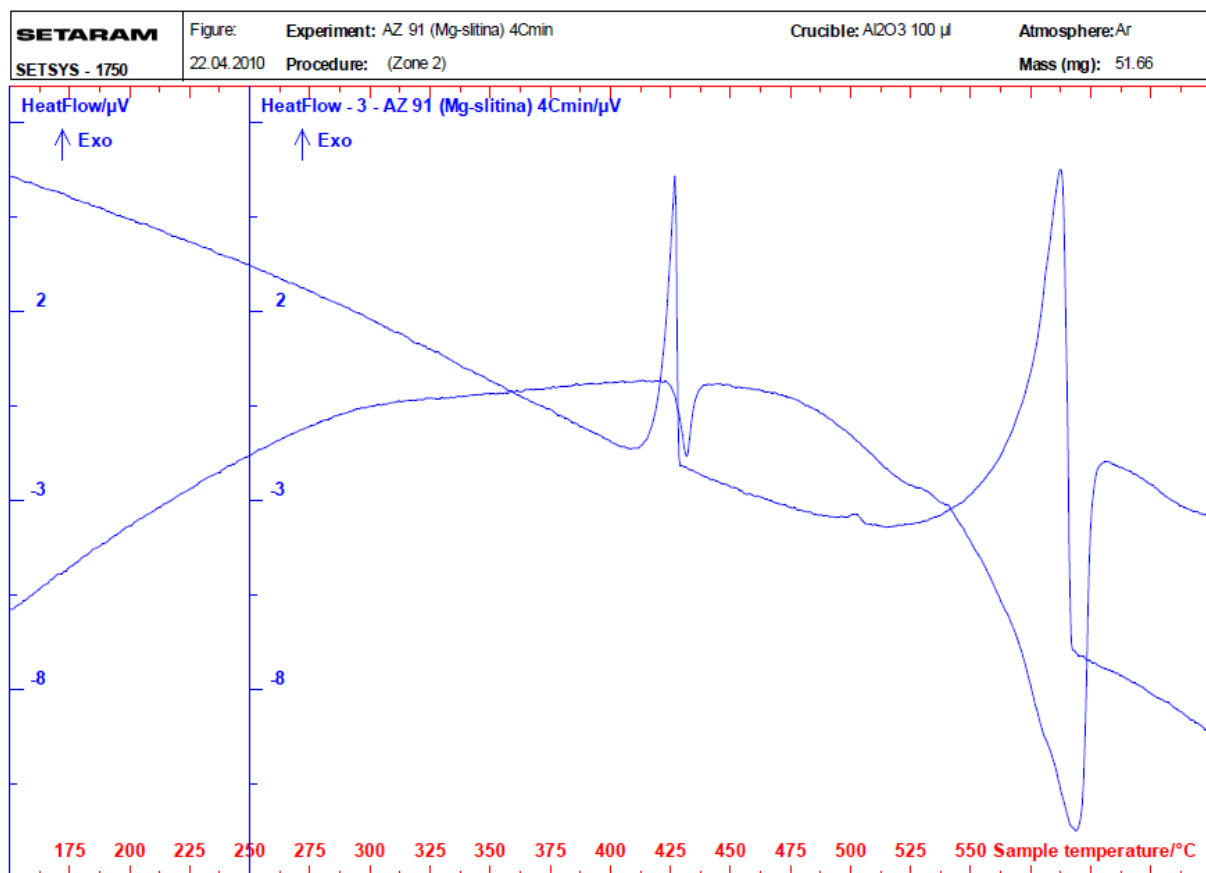
Příloha 4: AMZ40 ohřev, ochlazování

Příloha 5: AJ62 ohřev, ochlazování

Příloha 1: Mg 99,95 ohřev, ochlazováníMg 99,95; Ar; Al₂O₃; 5°C/min, ohřevMg 99,95; Ar; Al₂O₃; 5°C/min, ochlazování

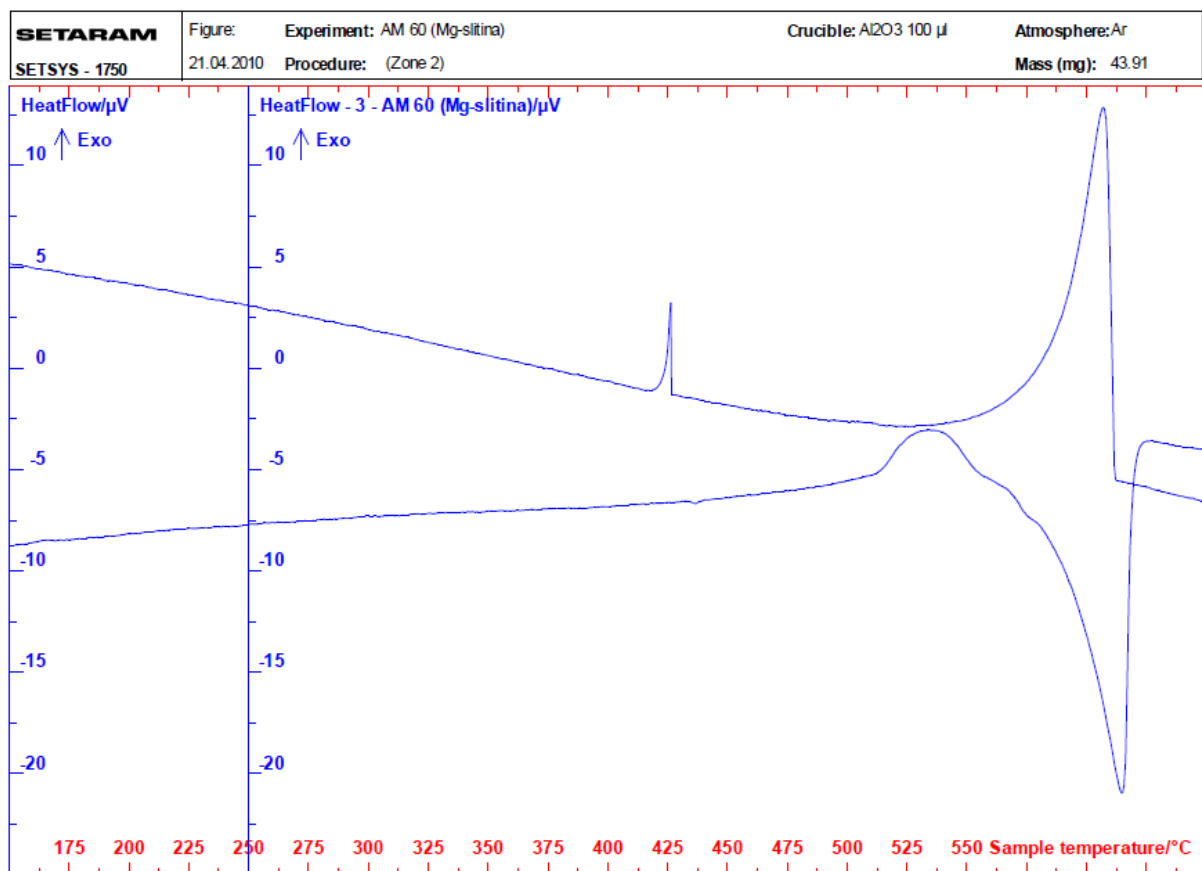
Příloha 2: AZ91, ohřev a ochlazování [28]

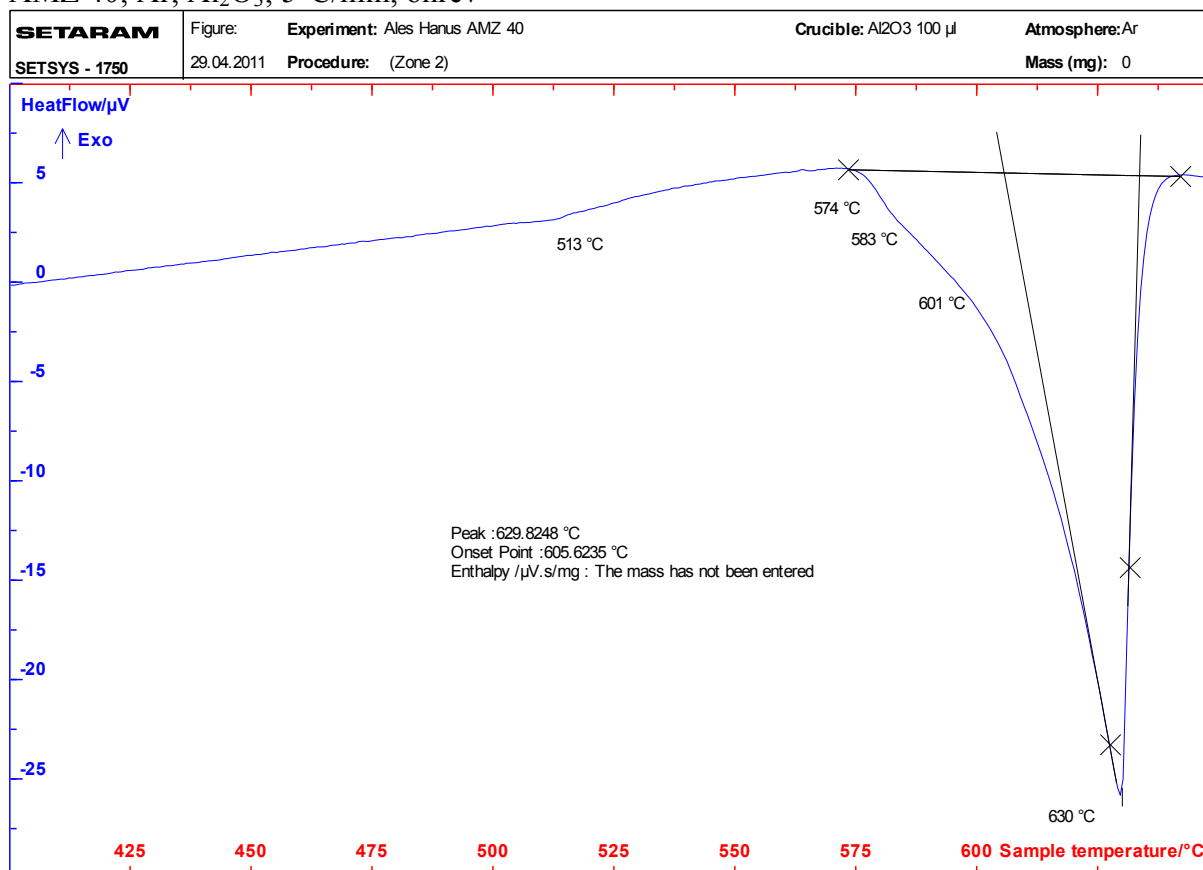
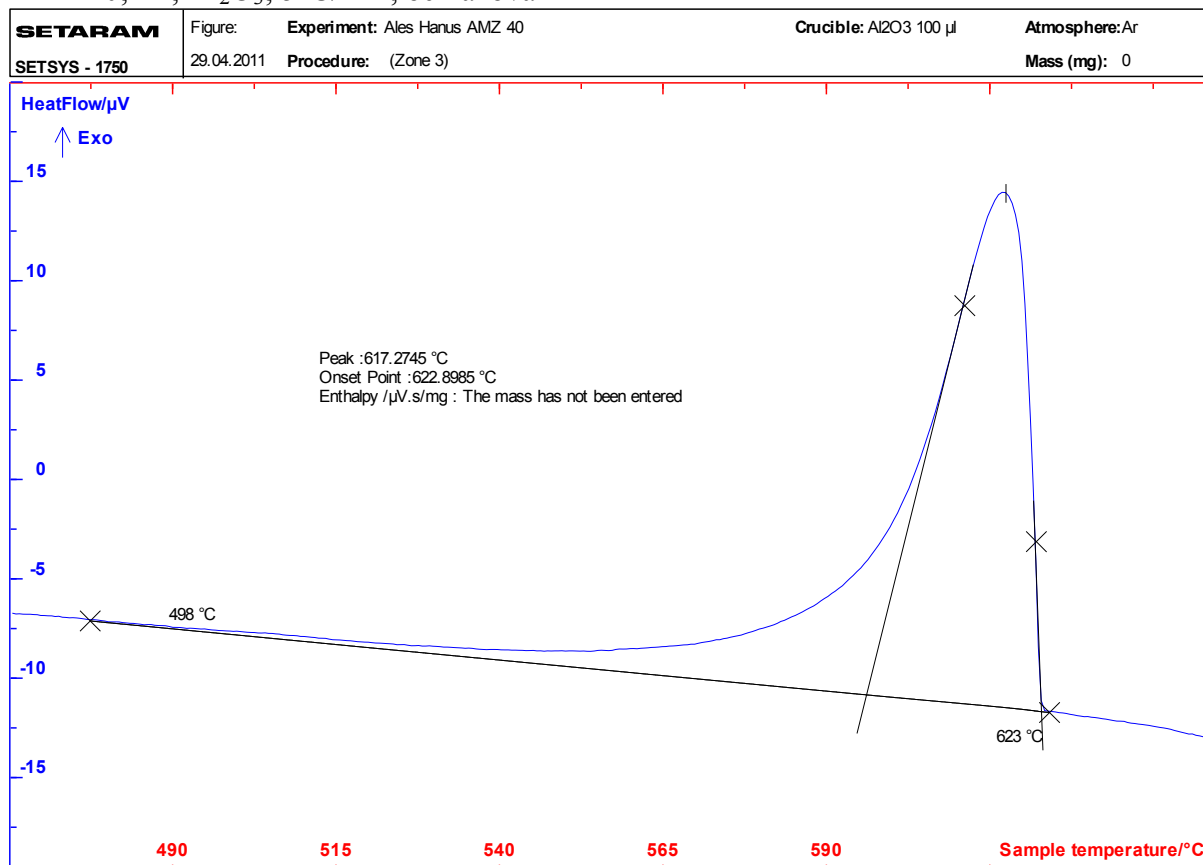
AZ91 ohřev a ochlazování

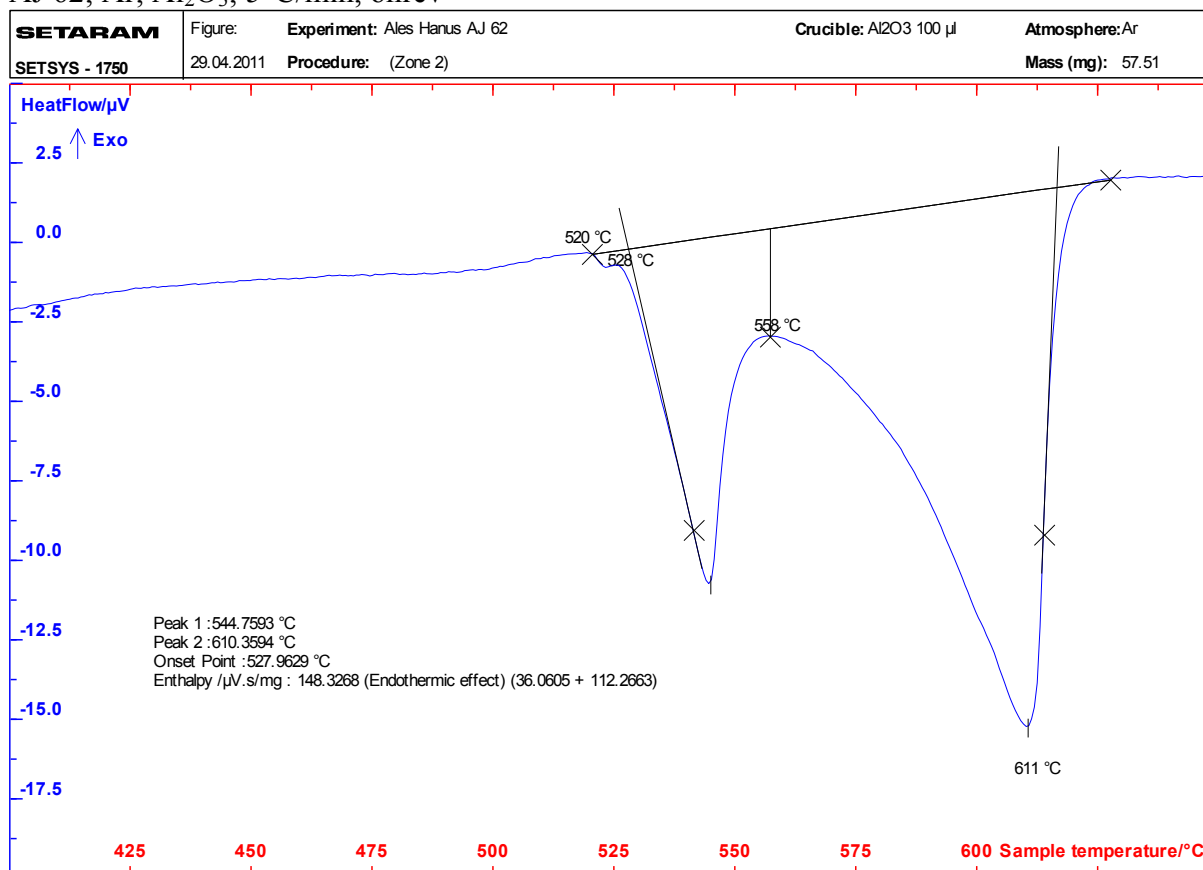


Příloha 3 - AM60 ohřev a ochlazování [28]

AM60 ohřev a ochlazování



Příloha 4: AMZ40 ohřev, ochlazováníAMZ 40; Ar; Al₂O₃; 5°C/min, ohřevAMZ 40; Ar; Al₂O₃; 5°C/min, ochlazování

Příloha 5: AJ62 ohřev, ochlazováníAJ 62; Ar; Al₂O₃; 5°C/min, ohřev**AJ 62; Ar; Al₂O₃; 5°C/min, ochlazování**